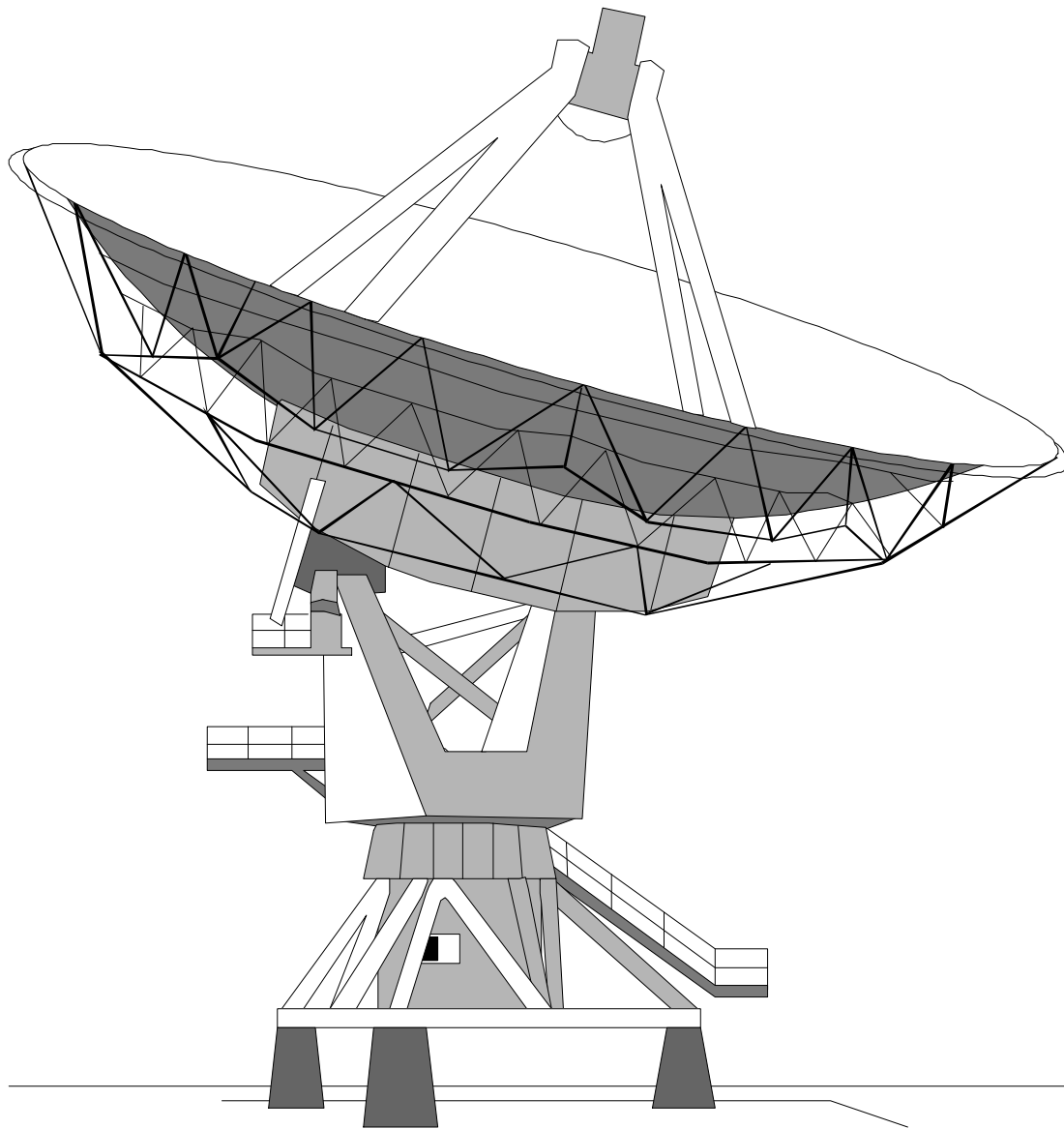




Fibras Óptica
DIDATEC – UTF1

Wander Rodrigues

CEFET – MG 2009

SUMÁRIO

Regras de Segurança **7**

Lição 960: Descrição do Cartão de Prática **9**

960.1 – Os componentes

960.2 - Descrição

Lição 961: A Fibra Óptica (I) **14**

961.1 – Introdução

961.2 – Estrutura

961.3 – Propagação da luz nas fibras ópticas

961.4 – Abertura numérica

961.5 – Exercícios

961.6 - Questões

Lição 962: A Fibra Óptica (II) **31**

962.1 – Modos de propagação

962.2 – Dispersão modal

962.3 – Redução da dispersão modal: fibras com índice gradual e modo simples

962.4 - Dispersão cromática

962.5 – Atenuação

962.6 – Largura de faixa

962.7 – Tabela sumário das fibras ópticas

962.8 – Características das fibras contidas no cartão de prática

962.9 - Questões

Lição 963: Acoplamentos**56**

963.1 – Introdução

963.2 - Uniões

963.2.1 – Perdas nas uniões

963.2.2 – Uniões por fusões

963.2.3 – Uniões mecânicas

963.3 – Conectores

963.4 - Exercícios

963.4.1 – Atenuação na fibra

963.4.2 – Perdas no acoplamento

963.4.3 – Atenuação na fibra em função do comprimento de onda

963.5 - Questões

Lição 964: Fontes Ópticas**73**

964.1 – Introdução

964.2 – LED

964.3 – Diodo Laser

964.4 – Fontes para acoplamento na fibra

964.5 – Tabela sumária das fontes ópticas

964.6 - Exercícios

964.6.1 – Potência óptica emitida pelos LED

964.6.2 – Curvas características dos LED

964.7 - Questões

Lição 965: Fotodetectores**91**

965.1 – Introdução

965.2 – Fotodiodos PN e PIN

965.3 – Fotodiodo de Avalanche

965.4 – Acoplamento entre fibra e detector

965.5 – Amplificação do sinal detectado

965.6 – Tabela sumário dos Fotodetectores

965.7 - Exercícios

965.7.1 - Resposta do detector

965.8 - Questões

Lição 966: Introdução aos Sistemas de Comunicações**111**

966.1 - Introdução

966.2 - Sistemas de comunicação digital

966.3 - Sistemas de comunicação analógica

966.4 - Dimensionamento de um link

966.4.1 - Margem de Potência

966.4.2 - Exemplo de cálculo de um link

966.5 - Questões

Lição 967: Sistema de Comunicação Digital**125**

967.1 - Sugestões teóricas

967.1.1 - Transmissor

967.1.2 - Receptor

967.2 - Exercícios

967.2.1 - Corrente de pré-polarização dos LED

967.2.2 - Ajuste da potência de saída

967.2.3 - Formas de onda do sinal transmitido

967.2.4 - Comprimento de onda operacional

967.2.5 - Formas de onda do sinal recebido

967.2.6 - Utilização de vários tipos de fibras

967.3 - Questões

Lição 968: Codificação e Transmissão de Dados**140**

968.1 - Sugestões teóricas

968.1.1 - Codificação Manchester / Bi-fase

968.1.2 - Decodificação Manchester / Bi-fase

968.1.3 - Interface V24 / RS232C

968.2 - Exercícios

- 968.2.1 – Seqüência de dados
- 968.2.2 – Encoders - Codificador
- 968.2.3 – Estabelecendo um link
- 968.2.4 – Transmissão de dados com Computador Pessoal

Lição 969: Multiplex de Sinais Digitais

- 969.1 – Sugestões teóricas
 - 969.1.1 – Diagrama em blocos de um sistema Multiplex / Demultiplex
 - 969.1.2 – Multiplexador
 - 969.1.3 - Demultiplexador
- 969.2 - Exercícios
 - 969.2.1 – Formas de onda do Multiplexador e Codificador
 - 969.2.2 – Estabelecendo um link

Lição 970: Transmissão de Sinais Analógicos

- 970.1 – Sugestões teóricas
 - 970.1.1 – Descrição geral
 - 970.1.2 – Transmissor modulador de FM
 - 970.1.3 – Receptor demodulador de FM
- 970.2 - Exercícios
 - 970.2.1 – Modulador de FM
 - 970.2.2 – Montando um link
 - 970.2.3 – Demodulador de FM
 - 970.2.4 – Exemplo de um link de áudio

Lição 971: Sistema de Comunicação Áudio / Vídeo

- 971.1 – Sugestões teóricas
 - 971.1.1 – Descrição geral
 - 971.1.2 – *Driver* analógico
 - 971.1.3 – Receptor analógico
 - 971.1.4 – Multiplexador Áudio / Vídeo
 - 971.1.5 – Demultiplexador Áudio / Vídeo

971.1.6 – Fontes de áudio e gerador de vídeo

971.2 – Exercícios

971.2.1 – Multiplexador Áudio / Vídeo

971.2.2 – Transmissor analógico: ponto de operação do LED

971.2.3 – Montando um link

Apêndice “A”: Unidade de Potência Óptica

Apêndice “B”: *Datasheet* dos componentes ópticos

VOLUME 2/2: MANUAL DE SERVIÇO – Circuitos

REGRAS DE SEGURANÇA

Mantenha esse manual a mãos para qualquer tipo de ajuda.

Após desembalar o equipamento, separe todos os acessórios a fim de que eles não se percam. Verifique se o cartão de prática está perfeito, sem nenhuma avaria aparente.

Antes de conectar a fonte de alimentação de $\pm 12\text{ V}$ ao cartão de prática, assegurem-se de que os cabos de energia estão adequadamente conectados à fonte de alimentação.

Esse equipamento deve ser empregado apenas para o uso que foi idealizado, isto é, como um equipamento educacional, e deve ser utilizado sob a supervisão direta de pessoal qualificado. Qualquer outra utilização não adequada é, por essa razão, perigosa. O fabricante não pode ser responsabilizado por qualquer dano devido a uma utilização inadequada, errada ou excessiva.

Precauções

Quando utilizar fibras ópticas ou outros componentes ópticos, obedçam as seguintes instruções gerais:

- **NÃO OLHE** diretamente em um conector de uma Fonte Óptica quando essa estiver em funcionamento. Certamente nada pode ser visto, porque o comprimento de onda emitido pode estar além do espectro visível, isto pode ser perigoso para a visão;
- **NÃO DOBRE** os cabos ópticos em círculos pequenos, porque a fibra interna aos cabos pode quebrar ou ser prejudicada. O raio mínimo de dobra está em torno de 2 cm;

- Após terminar os testes, coloque as capas adequadas nos conectores dos cabos ópticos, para proteção da fibra óptica que faceia os conectores da poeira;
- Limpe a cabeça dos conectores periodicamente com um cotonete de algodão embebido em álcool;
- O comprimento da fibra sem os conectores devem ser manuseada com **GRANDE CUIDADO**. As peças de fibra nua fornecidas sem a cobertura podem ser perigosas se elas entram em contatos com os olhos, a pele, ou se elas são engolidas.

Lição 960: Descrição do Cartão de Prática

960.1 – Os componentes

O sistema educacional para o estudo de fibras ópticas inclui os seguintes componentes (FIG. 960.1):

- Um cartão de prática UTF1;
- Cabo óptico #1: índice degrau, fibra plástica, 1000 μm , comprimento de 1,5 m;
- Cabo óptico #2: índice degrau, fibra plástica, 1000 μm , comprimento de 5 m;
- Cabo óptico #3: índice degrau, fibra de vidro, 200/230 μm , comprimento de 3 m;
- Cabo óptico #4: índice gradual, fibra de vidro, 50/125 μm , comprimento de 3 m;
- Cabo óptico #5: modo simples, fibra de vidro, 10 μm , comprimento de 3 m;
- Cabo óptico #6: comprimento de conexão de fibra de plástico com *ST – Snap_In HP connectors*;
- Um adaptador ST-ST;
- Um microfone;
- Acessório opcional: OPM – *Optical Power Meter* – Medidor de potência óptica.

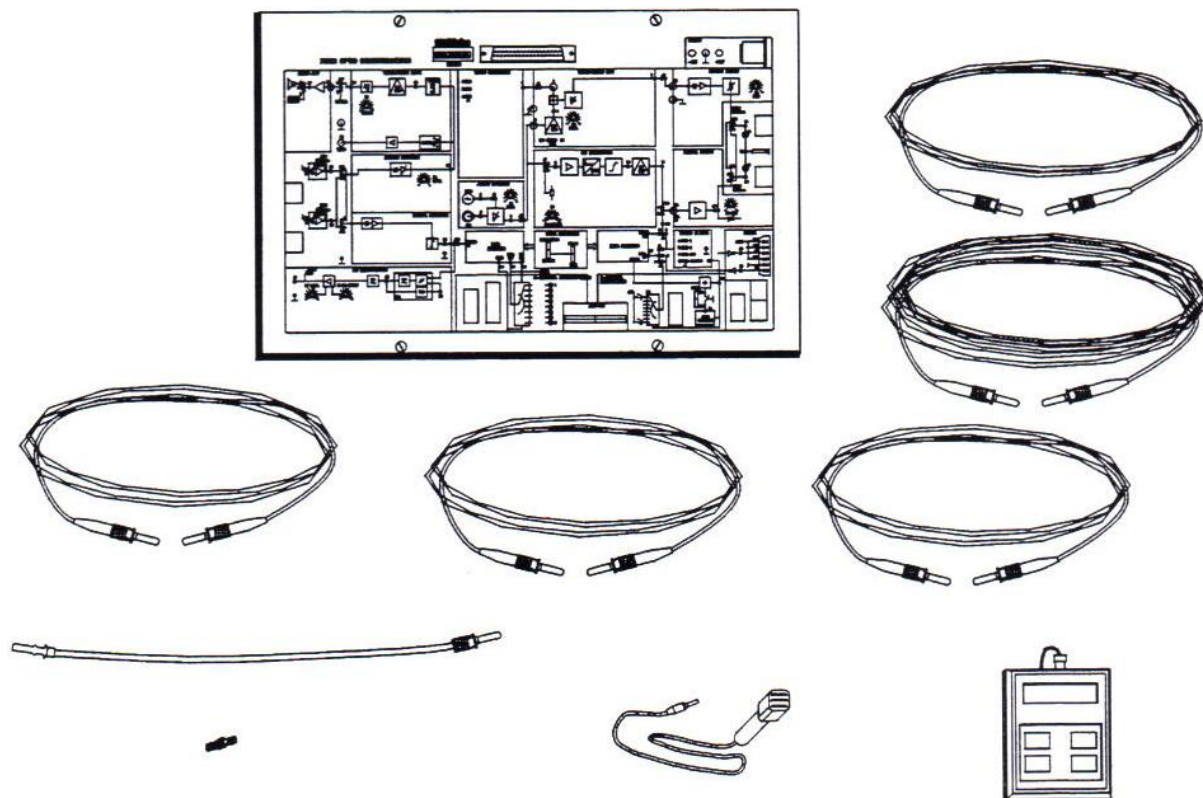


Figura 960.1 – Cartão de Prática UTF1 e acessórios.

960.2 – Descrição do Cartão de Prática

O cartão de prática UTF1 (FIG. 960.2) consiste das seguintes seções:

- Fontes de sinal
 - Gerador e dados TTL: 0/1/0&1/4x0&4x1;
 - Microfone;
 - Gerador de vídeo;
 - Interface RS232;
 - Tensão contínua.

- Codificadores de sinal:
 - Codificador de dados: Manchester; Bi-fase *Mark/Space* – Marca/Espaço;
 - Multiplexador de dados TDM com 8 canais;
 - Multiplexador vídeo+áudio incluindo um modulador de áudio (FM a 5,5 MHz) e um combinador áudio+vídeo;
 - Modulador de FM com portadora de pulso.
- Circuitos *driving* digital e analógico para as fontes ópticas;
- Fontes ópticas com LED a 660 nm e 820 nm;
- Fotodetectores com fotodiodo a 660 nm e 820 nm;
- Receptores digital e analógico;
- Decodificadores de sinais:
 - Decodificadores de dados: Manchester; Bi-fase *Mark/Space* – Marca/Espaço;
 - Demultiplexador de dados TDM com 8 canais;
 - Demultiplexador vídeo/áudio incluindo um separador e um demodulador de áudio (FM a 5,5 MHz);
 - Demodulador de FM com portadora de pulso
- Amplificador de áudio com auto-falate.

Essas seções podem ser conectadas uma nas outras, como será explicado durante os exercícios, a fim de construir circuitos e sistemas de comunicação com fibra óptica.

O cartão de prática é alimentado com uma tensão de ± 12 V DC por meio do conector **B** (FIG. 960.2) ou por um cabo de energia. Então uma tensão de +5 V DC é obtida a partir da tensão de +12 V DC, no cartão de prática.

O conector A deve ser conectado à FIP – *Individual Control Units* – Unidade de Controle Individual (refere-se ao *Service Handbook*, Volume 2/2).

As tensões de alimentação e os sinais empregados para o multiplexador e demultiplexador TDM estão marcados no conector C (Add-on) (refere-se a descrição dos diagramas elétricos, *Service Handbook*, Volume 2/2). Esse conector pode ser empregado em possíveis aplicações futuras.

As chaves SW (se presente) tem a mesma função da Unit SIS1. Elas introduzem falhas na operação dos circuitos, são ativadas segundo o que está descrito nos exercícios e devem ser ajustadas em OFF no início de cada exercício.

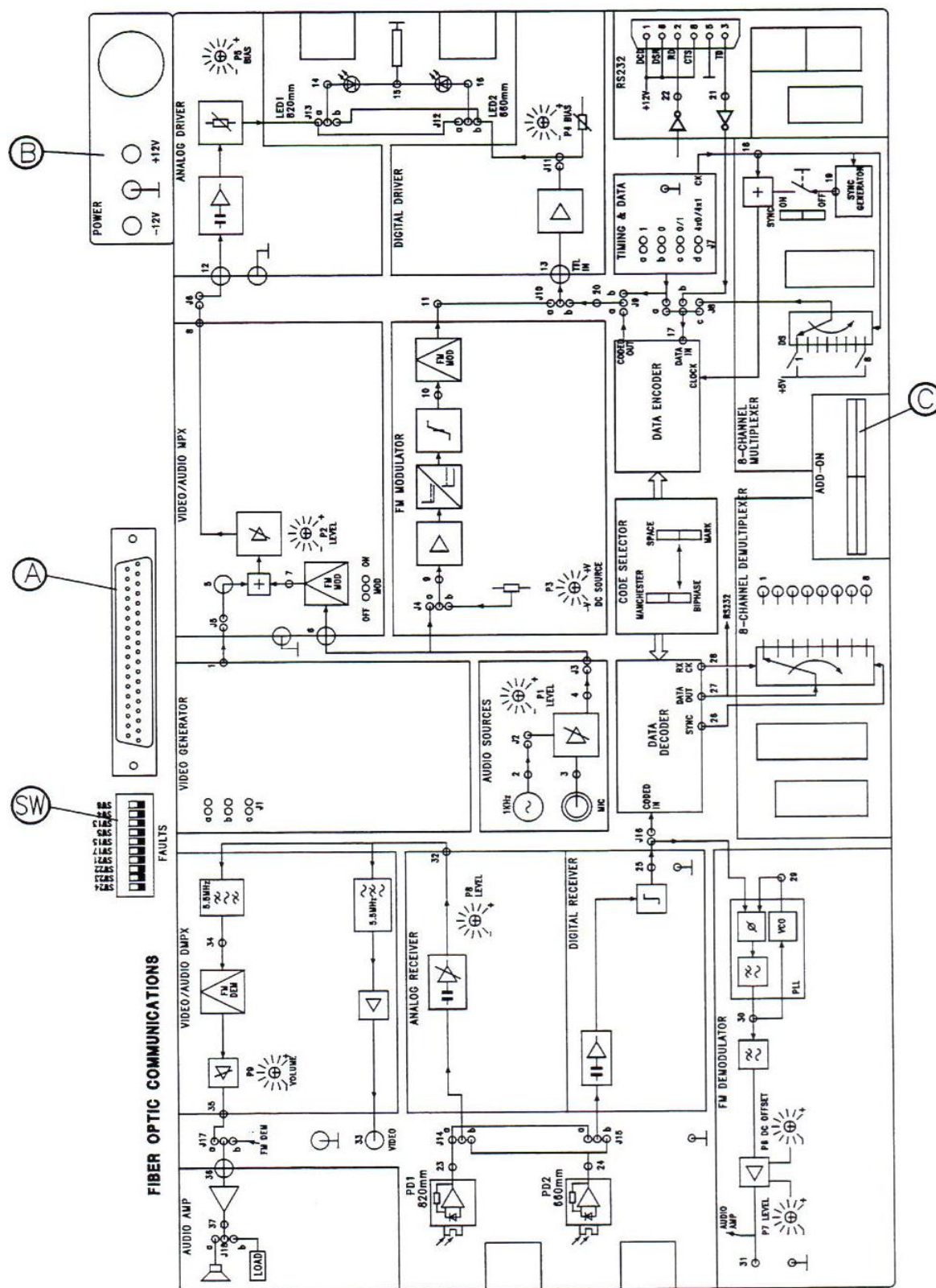


Figura 960.2 – Diagrama de Blocos do Cartão de Prática UTF1.

Lição 961: A Fibra Óptica

Objetivos:

- Descrever a estrutura de uma fibra óptica;
- Descrever como a luz propaga dentro de uma fibra óptica;
- Explicar os conceitos de Ângulo de Aceitação e Abertura Numérica.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;

961.1 – Introdução

Nos sistemas de comunicação tradicionais a informação está suportada por sinais elétricos ou eletromagnéticos. Porém, nos últimos anos, uma nova técnica de transmissão da informação através de sinais ópticos tem-se desenvolvido. O componente essencial para esses sistemas é o suporte que contém o sinal óptico e prende esse sinal da fonte até o destino. Essa função é obtida através do emprego da fibra óptica.

Os sistemas de comunicação com fibra óptica oferecem diversas vantagens em relação às facilidades proporcionadas pelos sistemas convencionais a cabo, que são:

- Largura de faixa ampla, consequentemente alta capacidade de transmissão;
- Alta imunidade aos ruídos eletromagnéticos;
- Sem irradiação do sinal;
- Menor tamanho
- Menor atenuação; o que possibilita links em longa distância sem qualquer amplificação intermediária.

Os componentes principais de um sistema de fibra óptica são (FIG.961.1):

- Cabo de fibra óptica;
- Interface eletro-óptica e fonte óptica;
- Fotodetector e interface óptica-elétrica.



Figura 961.1 – Sistema de comunicação com fibra óptica.

961.2 – Estrutura

A matéria-prima das fibras ópticas deve ser transparente á luz emitida pela fonte de luz inclusa no transmissor. Porém o termo fibra óptica é genérico e diz respeito a um amplo grupo de fibras de diferentes materiais (vidro, plástico, etc.) com diferentes dimensões e performances (por exemplo, a faixa de atenuação vai de menos de 1 dB/km a algumas centenas de dB/km).

A fibra nua

A estrutura básica capaz de propagar a luz é denominada de *nuber fiber* – fibra nua: ela consiste de um *Core* – núcleo e uma *Cladding* – cobertura. Contudo, essa estrutura é também muito frágil do ponto de vista mecânico; assim ele é reforçado com várias coberturas de proteção: o resultado é um cabo de fibra óptica simples. Vários cabos de fibra óptica simples reunida formam os cabos óticos múltiplo.

Núcleo e cobertura

Por essa razão as fibras ópticas e os cabos não são construídos com um único material homogêneo, mas eles consistem de camadas concêntricas de materiais apresentando características diferentes. A parte central de uma fibra é o núcleo – *Core* (FIG. 961.2): ele consiste de um cilindro de material transparente com um determinado índice de refração, n_1 . Uma camada coaxial de um outro material transparente com índice de refração n_2 (menor do que a do núcleo) é fixada em torno do mesmo núcleo. O próximo parágrafo explicará as condições exigidas para confinar a energia luminosa dentro do núcleo. Essa camada é denominada de cobertura – *Cloadding* e completa a estrutura da fibra agindo como um guia de ondas óptico. Note que o núcleo e a cobertura não podem estar separados consistem de um mesmo material (vidro-vidro ou plástico-plástico). Algumas vezes eles são fabricados de materiais diferentes (núcleo de vidro e cobertura de plástico), assim, por exemplo, nas fibras PCS (*Plastic Clad Sílica* – Sílica coberta com plástico). Existem algumas dimensões típicas para o núcleo e a cobertura de fibras ópticas mais comumente comercializadas:

- Fibras plásticas:
 - Núcleo = 480, 1000 μm
 - Cobertura = 500, 1000 μm

- Fibras índice degrau:
 - Núcleo = 100, 200 μm
 - Cobertura = 140, 230 μm
- Fibras índice gradual:
 - Núcleo = 50, 62,5 μm
 - Cobertura = 125 μm
- Fibra mono modo:
 - Núcleo = 10 μm
 - Cobertura = 125 μm .

As dimensões do núcleo e da cobertura são freqüentemente indicadas com o valor de seus dois diâmetros (expressos em μm) separadas por uma barra. Por exemplo: Fibra 50/125 significa que é uma fibra óptica apresentando um núcleo com diâmetro de 50 μm e uma cobertura com diâmetro de 125 μm .

Buffers - Isoladores

A estrutura mecânica de uma fibra nua é muito frágil; desta forma ela é reforçada com várias camadas de cobertura. Geralmente essas camadas são (FIG. 961.2):

- *Isolamento primário*, de resina plástica epoxy (diâmetro de 250 μm para fibras com cobertura de 125 μm);
- *Isolamento intermediário*, de silicone (diâmetro de 410 μm);
- *Isolamento secundário*, de material plástico (diâmetro de 900 μm).

Uma vez coberto, a fibra nua é o elemento básico para a construção de cabos de fibra óptica com múltiplos cabos ou fibra óptica simples.

Cabos de fibra óptica simples

Cabos de fibra óptica simples contêm uma fibra óptica básica consistindo do núcleo, da cobertura e do isolamento primário; eles podem ser construídos de dois tipos de estruturas principais:

- Estrutura livre (FIG. 961.3a);
- Estrutura rígida (FIG. 961.3b).

No primeiro caso a fibra coberta é inserida em um tubo plástico protetor. Algumas vezes esse tubo também é preenchido com um composto de poliuretano que previne a infiltração de água no ponto de travamento (fixação) da fibra. Essa estrutura é empregada em links de comunicação a longa distância e permite certo movimento à fibra; tanto assim que é possível a expansão ou a contração, devido as variações de temperatura ou por estresse mecânico, podem ser compensadas.

No outro caso, outras proteções, tal como nervuras de reforço e outras coberturas, serão adicionadas.

Cabos com múltiplas fibras

Além dos cabos com fibra óptica simples, também cabos ópticos com múltiplas fibras são construídos: cada cabo conta com poucas fibras até algumas centenas de fibras. A FIG. 961.4 apresenta a estrutura de um cabo com 56 fibras.

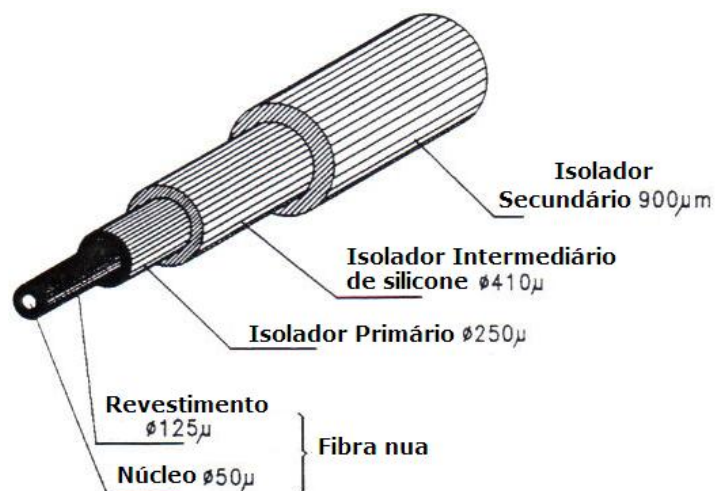


Figura 961.2 – Estrutura de uma fibra óptica com isoladores.

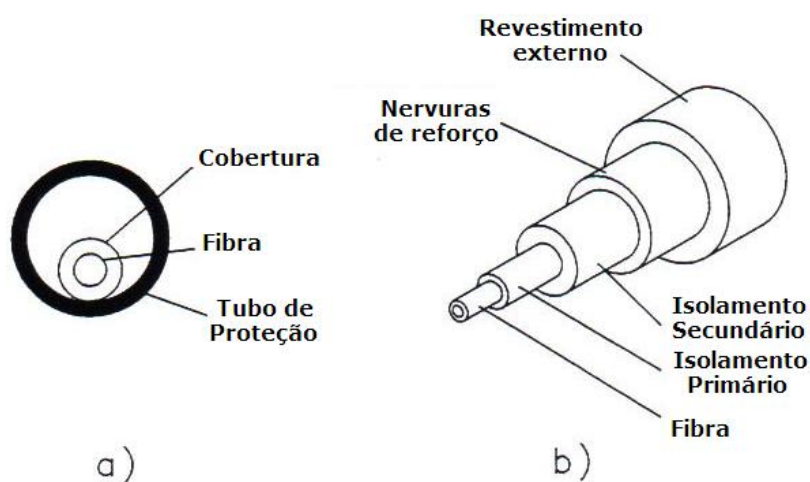


Figura 961.3 – Estrutura de cabos de fibra óptica simples:

a) cabo livre; b) cabo rígido.

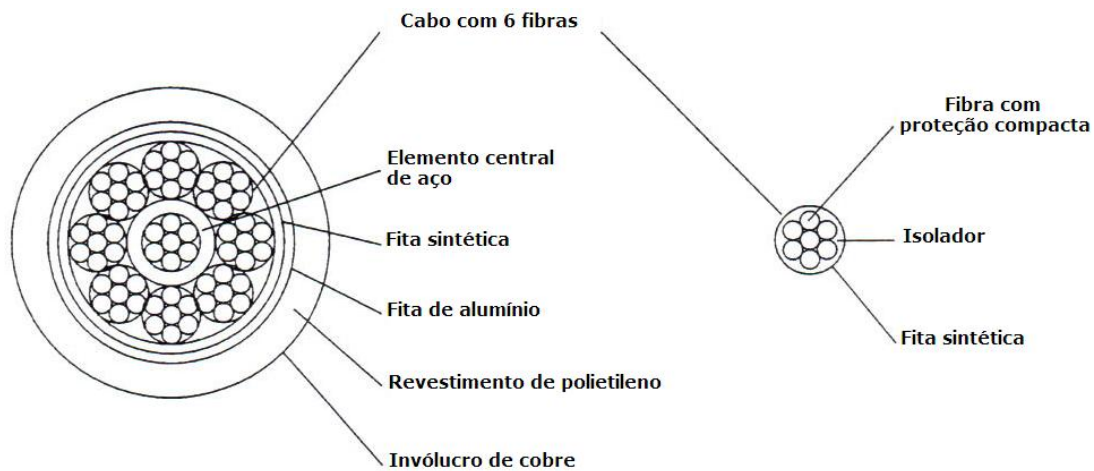


Figura 961.4 – Estrutura de um cabo de múltiplas fibras ópticas.

961.3 – Propagação da Luz nas Fibras Ópticas

A fibra índice degrau será considerada para descrever como a luz propaga dentro de uma fibra. Nesse tipo de fibra, o índice de refração passa por um degrau de variação entre a cobertura e o núcleo, então ele é mantido constante no núcleo da fibra. Os dois outros tipos de fibras: a fibra mono modo e a fibra com índice gradual serão descritas nos próximos parágrafos.

A propagação da luz no interior da fibra pode ser analisada, com boa aproximação, empregando as leis da óptica geométrica (uma análise mais apurada, precisa, exige a aplicação das equações de Maxwell). Essas leis afirmam que a luz propaga por meio de reflexões dos raios de luz passando nas vizinhanças entre as duas regiões com diferentes índices de refração (núcleo e cobertura). Suponha que:

$n_0 = 1$ = índice de refração do ar;

n_1 = índice de refração do núcleo;

n_2 = índice de refração da cobertura.

A FIG. 961.5 apresenta um raio de luz propagando no ar e entrando no núcleo da fibra com um ângulo de incidência θ_0 com relação ao eixo dessa mesma fibra. Mas ele é refratado pela superfície ar-núcleo e então atinge o núcleo com um ângulo θ_1 , sendo diferente de θ_0 e definido pela Lei de Snell:

$$n_0 \text{ sen } \theta_0 = n_1 \text{ sen } \theta_1$$

[961.1]

A propagação do raio de luz incidente na fibra depende do ângulo de incidência desse mesmo raio quando atinge a superfície de separação núcleo-cobertura. Se esse ângulo está abaixo de um determinado valor, θ_c (ângulo crítico), o raio não será refratado, porém ele será refletido completamente e assim ele propaga: esse é um raio guiado. Caso contrário, os raios que atingem a superfície núcleo-cobertura com um ângulo maior do que θ_c serão refratados parcialmente, desta forma parte da energia é perdida em um espaço muito pequeno (raio radiado) ou após certo número de reflexões (raios vazados).

Também a refração na superfície núcleo-cobertura segue a Lei de Snell. Partindo do ângulo crítico tem-se que o raio é refratado com um ângulo de 0° em relação ao eixo da fibra (FIG. 961.6). Suponha que:

$90^\circ - \theta_1$ = ângulo de incidência na superfície núcleo-cobertura;

$90^\circ - \theta_2$ = ângulo de refração.

Aplicando a Lei de Snell:

$$n_1 \text{ sen}(90^\circ - \theta_1) = n_2 \text{ sen}(90^\circ - \theta_2)$$

[961.2]

se $\theta_2 = 0$, o resulta é:

$$n_1 \text{ sen}(90^\circ - \theta_c) = n_2 \text{ sen}(90^\circ) = n_2$$

[961.3]

do que: $\sin(90^\circ - \theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$

[961.4]

conseqüentemente, $\cos(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$

[961.5]

Na FIG. 961.6a: $\theta_1 > \theta_c$ e haverá refração; na FIG. 961.6b: $\theta_1 = \theta_c$ e o raio refratado está paralelo à superfície núcleo-cobertura; na FIG. 961.6c: $\theta_1 < \theta_c$ e a reflexão será total.

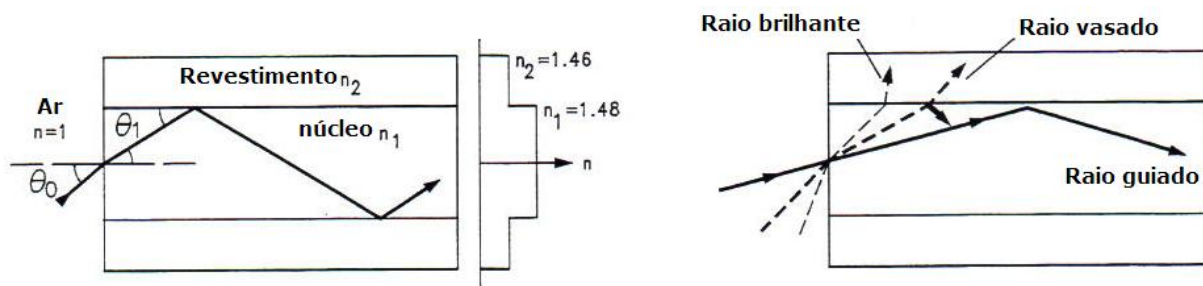


Figura 961.5 – Propagação da luz dentro da fibra.

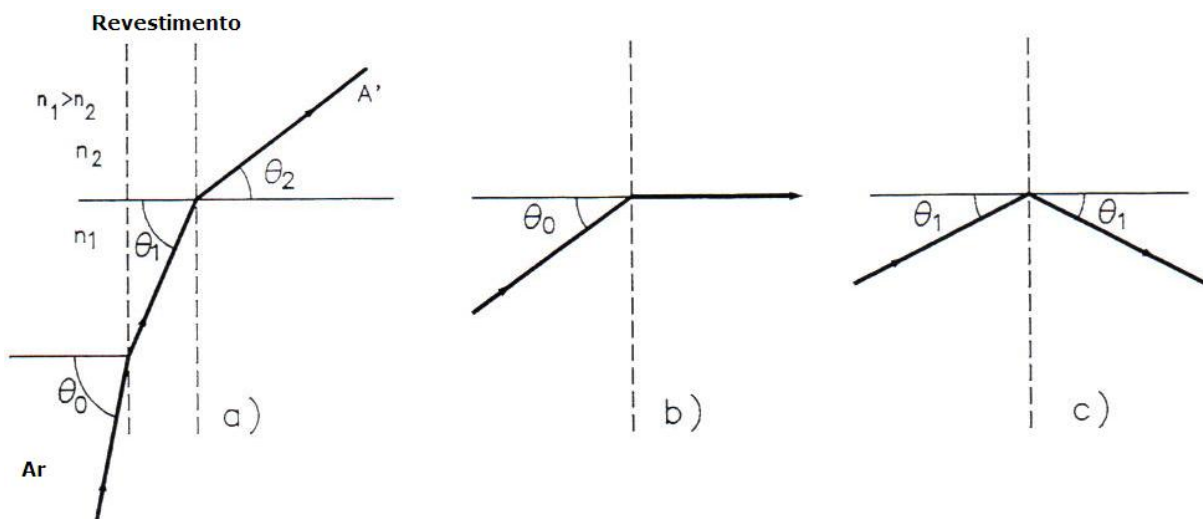


Figura 961.6 – Refração e reflexão dentro da fibra.

961.4 – Abertura Numérica

Partindo-se das equações anteriores, determina-se o valor máximo para o ângulo θ_0 no qual o raio de luz pode entrar na fibra. Aplicando a equação [961.1] onde $n_0 = 1$, obtém-se:

$$\frac{\text{sen}(\theta_0)}{n_1} = \sqrt{1 - \cos^2(\theta_1)}$$

[961.6]

O caso limite estabelece que $\theta_1 = \theta_c$. Então, a partir das equações [961.6] e [961.5] resultam na expressão:

$$\text{sen}(\theta_{0\text{max}}) = n_1 \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2}$$

[961.7]

e, conseqüentemente:

$$\text{sen}(\theta_{0\text{max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

[961.8]

O valor $\text{sen}(\theta_{0\text{max}})$ é denominado Abertura Numérica (NA):

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

[961.9]

Ângulo e Cone de Aceitação

Portanto, a abertura numérica fixa o limite superior do ângulo no qual um raio deve entrar na fibra de forma a ser guiado e nela propagar. Qualquer raio tocando a superfície ar-fibra com um ângulo excedendo ao valor $\text{arc sen}(NA)$ será refratado e perdido. Esse ângulo crítico é conhecido como Ângulo de Aceitação (FIG. 961.7). Imagine essa situação em três dimensões: observe que

um cone, denominado Cone de Aceitação (FIG. 961.8) é formado á entrada do núcleo da fibra óptica.

Comentários

Valores típicos de NA variam de 0,1 (fibras mono modo) á aproximadamente 0,5 (fibras índice degrau), correspondendo a ângulos de aceitação entre, aproximadamente, 6° e 30° (FIG. 961.9). Com valores elevados de NA torna-se mais fácil a luz entrar na fibra, mas ao mesmo tempo, aumenta a atenuação e a faixa passante da fibra é reduzida o que permite um número maior de modos de propagação na fibra. Caso contrário, um valor muito baixo de NA implica em poucos modos de propagação e conseqüentemente, um alargamento na faixa, porém o acoplamento da fibra á fonte torna-se mais difícil.

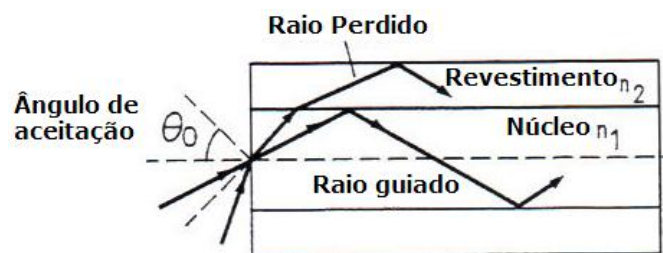


Figura 961.7 – Ângulo de Aceitação.

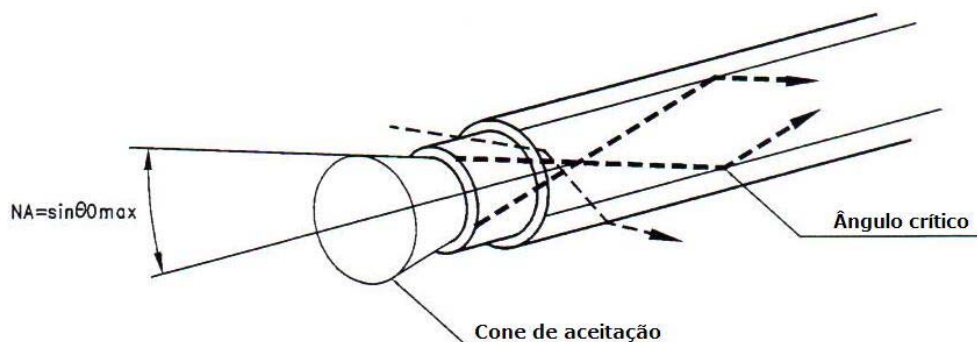


Figura 961.8 – Cone de Aceitação.

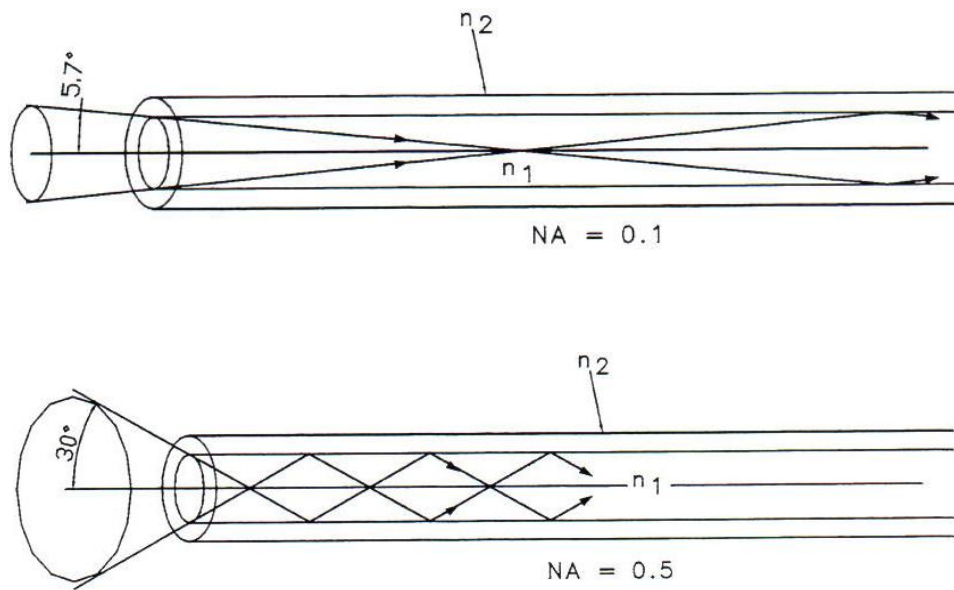


Figura 961.9 – Abertura numérica.

961.5 - Exercícios

Advertências

Quando as fibras ópticas ou componentes ópticos são utilizadas, é melhor seguir as seguintes instruções gerais:

- **NÃO OLHE** no conector das Fontes Ópticas quando essas estiverem em operação. Ainda que nada possa ser visto porque o comprimento de onda emitido pode estar além do espectro visível, isso pode ser perigoso e prejudicial para a visão;
- **NÃO DOBRE** os cabos ópticos em laços, voltas muito estreitas, porque as fibras dentro do cabo podem quebrar ou ser danificadas. O raio de enrolamento mínimo está em torno de 2 cm;
- Após terminar os testes, coloque as coberturas de proteção nos conectores nas extremidades dos cabos ópticos para proteger a face da fibra junto ao conector da poeira;

- Limpe a cabeça dos conectores, periodicamente, com um chumaço de algodão embebido em álcool;
- O comprimento da fibra sem os conectores devem ser manuseados com **GRANDE CUIDADO**. Os fragmentos da fibra óptica nua, que vem sem a cobertura, podem ser perigosos se eles entram em contato com os olhos, a pele ou se eles são engolidos.

FIP – Entre com o código da lição: 961.

Observe os cabos de fibra óptica #1, #2, #3, #4, #5 que acompanham o cartão de prática.

Q1 – A camada externa é:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 4 | O núcleo. |
| 2 | 3 | A cobertura. |
| 3 | 1 | O revestimento da uma fibra nua. |
| 4 | 5 | O revestimento de múltiplos cabos. |
| 5 | 6 | Um isolador secundário. |
| 6 | 2 | O revestimento de um cabo com uma única fibra. |

Q2 – Remova o protetor, cuidadosamente, de um dos conectores do cabo #1. O que é esse pequeno furo no centro da face do conector?

Grupo

A B

- 1 2 Um furo pelo qual normalmente tem-se acesso á fibra.
- 2 4 Um furo a fibra nua faceia.
- 3 3 Um furo necessário para limpar a fibra dentro do cabo.
- 4 1 Um furo para a inserção de outra fibra.

Remova o protetor cuidadosamente dos conectores dos cabos #1, #3, #4 e #5. Aponte o conector de um dos cabos para uma fonte de luz (luz solar, lâmpada, etc.) e observe o furo do outro conector do mesmo cabo. Execute a mesma operação com todos os outros cabos.

Q3 – Qual das seguintes sentenças é verdadeira?

Grupo

A B

- 1 3 A mesma quantidade de luz sai de todos os furos.
- 2 3 O furo mais brilhante corresponde ao do cabo #1, o de menor brilho corresponde ao do cabo #5. Os núcleos das fibras ópticas apresentam o mesmo diâmetro. A cobertura da fibra no cabo #1 tem um diâmetro maior do que a cobertura da fibra no cabo #5.
- 3 1 As dimensões dos furos decrescem segundo a seguinte sequência: cabo#1, cabo #3, cabos #4 e #5 (de iguais dimensões). Os diâmetros dos furos dependem do diâmetro da fibra nua. A intensidade da mancha de luz decresce segundo a seguinte sequência: cabo #1, cabo #3, cabo #4, cabo #5, e depende do diâmetro do núcleo da fibra.

961.6 Questões

Q4 – A estrutura principal de uma fibra óptica deve incluir:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | O núcleo (camada externa, de vidro) e a cobertura (cilindro interno, de plástico). |
| 2 | 3 | O núcleo (cilindro interno, de vidro) e o segundo isolador (camada externa, de plástico). |
| 3 | 2 | O núcleo (cilindro interno, de vidro ou plástico) e a cobertura (camada externa do mesmo material do núcleo, mas com índice de refração maior). |
| 4 | 1 | O núcleo (cilindro interno, de vidro ou plástico) e a cobertura (camada externa do mesmo material do núcleo, mas com índice de refração menor). |

Q5 – Fibra nua significa que:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 2 | O núcleo e a cobertura podem ser separados com pedaços de material adequado, fino e longo. |
| 2 | 1 | É uma fibra constituída do núcleo, da cobertura e dos isoladores: primário e secundário. |
| 3 | 4 | O núcleo e a cobertura não podem ser separados. |
| 4 | 3 | É uma fibra com todos os seus revestimentos, exceto o revestimento externo do cabo. |

Q6 – A marcação “Fibra 100/140” indica que:

Grupo

A B

- 1 6 Uma fibra para a propagação da luz na faixa de 100 a 140 nm.
- 2 4 Índices de refração do núcleo (100) e da cobertura (140).
- 3 5 A abertura numérica (100) e o ângulo de aceitação (140).
- 4 3 A abertura numérica (100) e a atenuação em dB/km (140).
- 5 2 Os diâmetros do núcleo (100) e da cobertura (140), em milímetros.
- 6 1 Os diâmetros do núcleo (100) e da cobertura (140), em microns.

Q7 – Dentro de uma fibra índice degrau a luz propaga:

Grupo

A B

- 1 2 Pela refração contínua dentro da cobertura.
- 2 1 Dentro da cobertura, pela reflexão na superfície de separação entre a cobertura e o isolador.
- 3 5 Pela refração contínua dentro do núcleo.
- 4 3 Dentro do núcleo, pela reflexão na superfície de separação entre o núcleo e a cobertura.
- 5 4 Pela difusão contínua dentro da cobertura.

Q8 – A propagação da luz na fibra:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 5 | Entra com um ângulo mais estreito que a abertura numérica da fibra. |
| 2 | 4 | Entra com um ângulo maior que o ângulo de aceitação da fibra. |
| 3 | 2 | Entra na cobertura. |
| 4 | 1 | Entra com um ângulo mais estreito que o ângulo de aceitação da fibra. |
| 5 | 3 | Tem um comprimento de onda igual a abertura numérica da fibra. |

Q9 – Qual das seguintes sentenças está correta?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 3 | O ângulo de aceitação é o seno da abertura numérica ($\sin NA$). O NA das fibras mono modo é menor que o das fibras de índice degrau. |
| 2 | 1 | A abertura numérica (NA) é o seno do ângulo de aceitação. O NA das fibras mono modo é maior do que das fibras de índice degrau. |
| 3 | 2 | A abertura numérica (NA) é o seno do ângulo de aceitação. O NA das fibras mono modo é menor do que das fibras de índice degrau. |

Lição 962: A Fibra Óptica (II)

Objetivos:

- Descrever outros conceitos e parâmetros que caracterizam as fibras ópticas: dispersão modal; Índice degrau; Índice gradual; fibras mono modo; dispersão cromática; largura de faixa; atenuação; janelas.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática.

962.1 – Modos de propagação

Analisando o fenômeno da propagação utilizando as equações de Maxwell chega-se ao conceito de *Modos de Propagação*. Esse assunto será examinado nesse parágrafo por meio de considerações simples, sem exigir do aluno conceitos rigorosos e complexos.

O *Modo de Propagação* é a configuração do campo eletromagnético dentro da fibra, que depende da geometria dessa fibra e da inclinação fornecida pela índice de refração.

Frequência normalizada

A propagação com *modos* pode ser mais bem explicada se a *Frequência Normalizada* (V) e a *Frequência de Corte* de um modo são definidas. A *Frequência Normalizada* V é um parâmetro que incluem todas as principais variáveis da qual a propagação depende, isto é: comprimento de onda da energia luminosa (luz), raio do núcleo, índices de refração do núcleo e da cobertura. Ela é definida pela expressão:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{l} \cdot r \cdot NA \quad [962.1]$$

Onde: λ = Comprimento de onda da luz (energia luminosa);

r = raio do núcleo;

n_1 = índice de refração do núcleo;

n_2 = índice de refração da cobertura.

Índice de refração efetivo e Frequência de corte

A solução das equações de Maxwell permite sumarizar os resultados em um gráfico como aquele apresentado na FIG 962.1: esse gráfico mostra a tendência do também chamado Índice de Refração Efetivo, n_{eff} versus a Frequência Normalizada, V , para alguns modos de propagação. Observe os seguintes aspectos:

- ♦ n_{eff} varia entre n_1 e n_2 ($n_1 > n_2$);
- ♦ Cada modo de propagação tem seu próprio número V , denominado *Frequência de Corte* V_c , abaixo do qual não haverá propagação;

- ♦ O primeiro modo, também denominado “fundamental”, tem $V_C = 0$, o segundo modo, $V_C = 2,405$. Os modos seguintes apresentam um aumento nas frequências de corte V_C .

Uma vez conhecido o valor de V , que apenas depende da geometria e dos parâmetros da fibra, a energia luminosa propagará dentro da fibra apenas para aqueles modos que apresentem uma *frequência de corte* V_C menor do que V . Considere um exemplo com os seguintes valores numéricos:

$$\lambda = 1,5 \mu\text{m} \quad r = 5 \mu\text{m} \quad \text{NA} = 0,15$$

O resultado é:

$$V \approx 3,14$$

Observando o gráfico da FIG 962.1 e considerando $V = 3,14$ pode-se fazer os seguintes comentários:

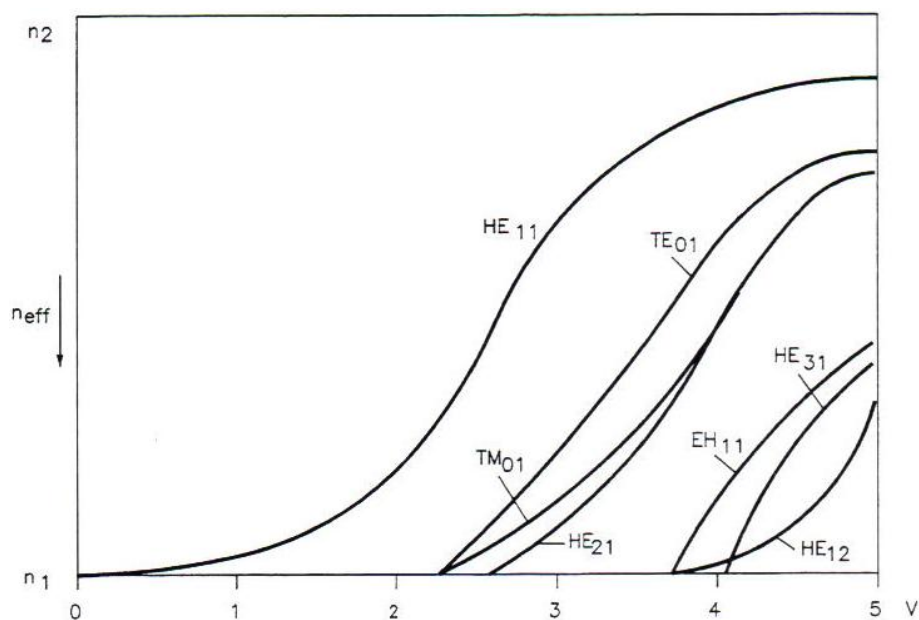


Figura 962.1 – Modos de propagação.

- ♦ A energia luminosa propaga apenas nos modos indicados com HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} ;
- ♦ O Índice de Refração Efetivo n_{eff} correspondente ao modo HE_{11} é menor do que todos os outros modos. Isso significa que neste modo a luz propaga a uma velocidade maior do que nos outros modos (relembrando que a velocidade de propagação da luz dentro em um meio é inversamente proporcional ao índice de refração do mesmo meio).

Multímodo e mono modo

As fibras podem ser classificadas em multimodo ou em fibras mono modo, segundo o número de modos ativos. Fibras mono modos devem ter $V < 2,405$, tanto que a luz pode propagar apenas no primeiro modo (modo fundamental).

962.2 – Dispersão modal

Realmente, a luz emitida a partir de uma fonte de luz e que entra na fibra não consiste de um único raio de luz, mas de vários raios atingindo o núcleo da fibra em diferentes ângulos (FIG 962.2).

De acordo com o que foi explicado antes e na lição 961 para as fibras multimodos índice degrau, existem diferentes caminhos (ou modos), com diferentes comprimentos, em função do ângulo de entrada. É intuitivo perceber que um raio entrando com um ângulo $\theta_0 = 0^\circ$ está paralelo ao eixo da fibra e seu caminho é exatamente o comprimento da fibra, contudo um raio entrando com a inclinação máxima permissível (θ_{0max}) terá um caminho maior (FIG. 962.3).

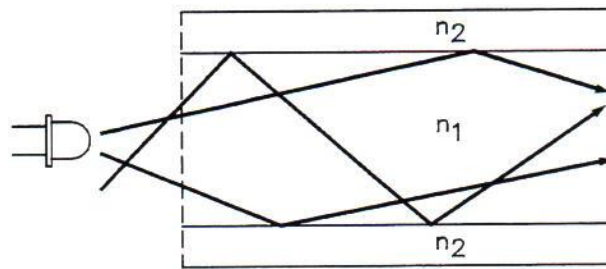


Figura 962.2 – Luz penetrando na fibra.

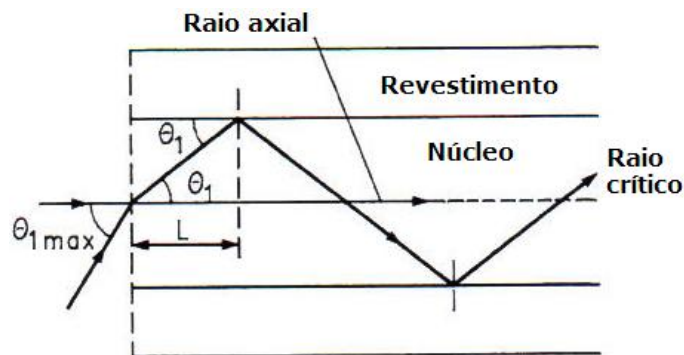


Figura 962.3 – Trajetória de propagação.

A diferença entre os tempos de propagação (trânsito) pelo raio axial ($\theta_o = 0^\circ$) e pelo raio crítico ($\theta_o = \theta_{o\max}$ e desde que $\theta_1 = \theta_c$, onde θ_c é o ângulo crítico; refere-se à lição 961) pode ser calculada como se segue. Suponha:

- ♦ L = unidade de comprimento;
- ♦ $c = 3 \times 10^8$ m/s = velocidade da luz;
- ♦ $v_1 = c/n_1$ = velocidade de propagação da luz dentro do núcleo.

O tempo de propagação para o raio axial é igual a:

$$T_a = \frac{L}{v_1} = \frac{L}{c} \cdot n_1 \quad [962.2]$$

O tempo de propagação para o raio crítico é igual a:

$$T_r = \frac{L / \cos \theta_c}{v_1} \quad [962.3]$$

Utilizando a equação [961.5]: $\cos(\theta_c) = n_2 / n_1$ obtém-se:

$$T_r = \frac{L}{c} \cdot \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad [962.4]$$

O resultado da diferença em T_r e T_a , dividido pela unidade de comprimento L , é o atraso máximo $\delta T_{\max}$ por unidade de comprimento:

$$\delta T_{\max} = T_r - T_a = \frac{n_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \quad [962.5]$$

Por exemplo, supondo $n_1 = 1,51$ e $n_2 = 1,50$ tem-se

$$\delta T_{\max} \approx 33 \text{ ns/km.}$$

Desta forma, um pulso luminoso entrando na fibra em diferentes ângulos sairá estendido, alargado no tempo, em função de seus vários caminhos ou trajetórias dentro da fibra (FIG 962.4). Esse efeito, devido a diferentes modos de propagação da luz dentro da fibra é denominado de *Dispersão Modal* ou *Dispersão Intermodal*. A *Dispersão Modal* é expressa em ns/km, e seu efeito aumenta com o aumento no comprimento da fibra.

Numa transmissão digital o sinal enviado consiste em um trem de pulsos; quando estes pulsos são alargados, eles podem interferir uns com os outros de forma que não permitam a decodificação na recepção. A FIG. 962.5 apresenta dois exemplos de sinais onde os pulsos recebidos foram alargados pela dispersão modal. Está claro que a *Dispersão Modal* limita a capacidade de transmissão, que é o número de pulsos que podem ser transmitidos na unidade de tempo. Pode-se facilmente compreender que esse parâmetro afeta a faixa passante da fibra.

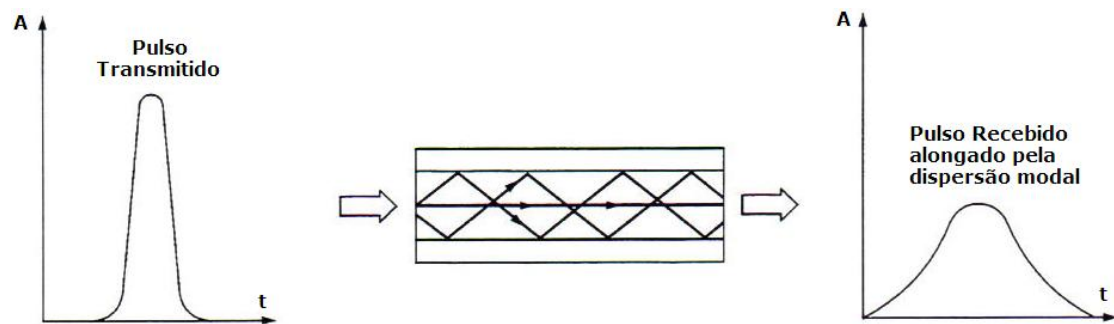


Figura 962.4 – Alargamento do pulso devido a Dispersão Modal.

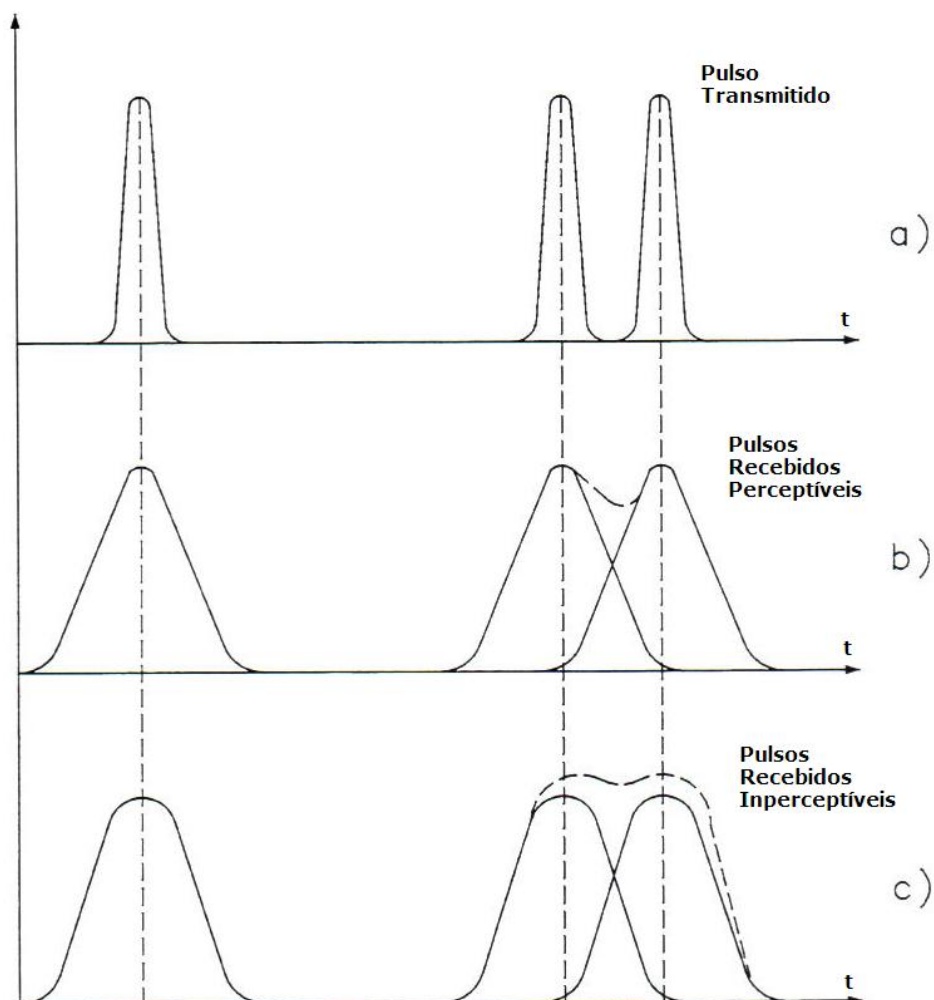


Figura 962.5 – Efeitos da Dispersão Modal nos pulsos transmitidos.

962.3 – Redução da dispersão modal: Fibras com Índice Gradual e Mono modo

A Dispersão Modal pode ser consideravelmente reduzida quando dispositivos específicos são adotados na construção das fibras ópticas.

As fibras examinadas até o momento são do tipo *Índice Degrau*, onde existe uma variação distinta do índice de refração entre o núcleo e a casca.

Fibras de Índice gradual

Um método para reduzir a dispersão modal consiste na construção do núcleo de tal forma que o índice de refração varia gradualmente partindo do centro em direção à casca (FIG. 962.6b). O melhor perfil para o índice de refração corresponde àquele descrito por uma função parabólica.

Nesse caso, o raio de luz será continuamente desviado (refrações contínuas), em vez de serem refletidos precisamente pela casca, e sua trajetória torna-se uma curva. Os raios que entram com um ângulo muito aberto curvarão a uma distância maior. Porém, como a velocidade de propagação é muito maior dentro do núcleo (porque o índice de refração é menor), os tempos de propagação dos raios com curvaturas diferentes (distâncias diferentes) serão compensados.

Elas são denominadas fibras de índice gradual e são caracterizadas pela baixa dispersão modal quando comparadas às fibras de índice degrau. Uma fórmula aproximada para determinar a máxima diferenças nos tempos de propagação, para um núcleo com índice de refração parabólico, pode ser expressa como se segue:

$$\delta T_{\max} = \frac{n_1}{2c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2$$

[962.6]

Por exemplo, supondo: $n_1 = 1,51$ e $n_2 = 1,50$ tem-se:

$$\delta T_{\max} \approx 0,1 \text{ ns/km.}$$

Fibras Mono modo

O perfil do índice de refração pode ser do tipo Índice Degrau, como apresentado na FIG 962.6c, ou ele poderá inclinar-se o que aperfeiçoa o desempenho específico da fibra. Um exemplo pode ser visto pelo perfil desse índice em fibras otimizadas para serem utilizadas a 1300 nm (FIG. 962.7a, perfil da cobertura achatado) e de 1550 nm (FIG. 962.7b, perfil triangular com anel circular, para fibras com dispersão modificada).

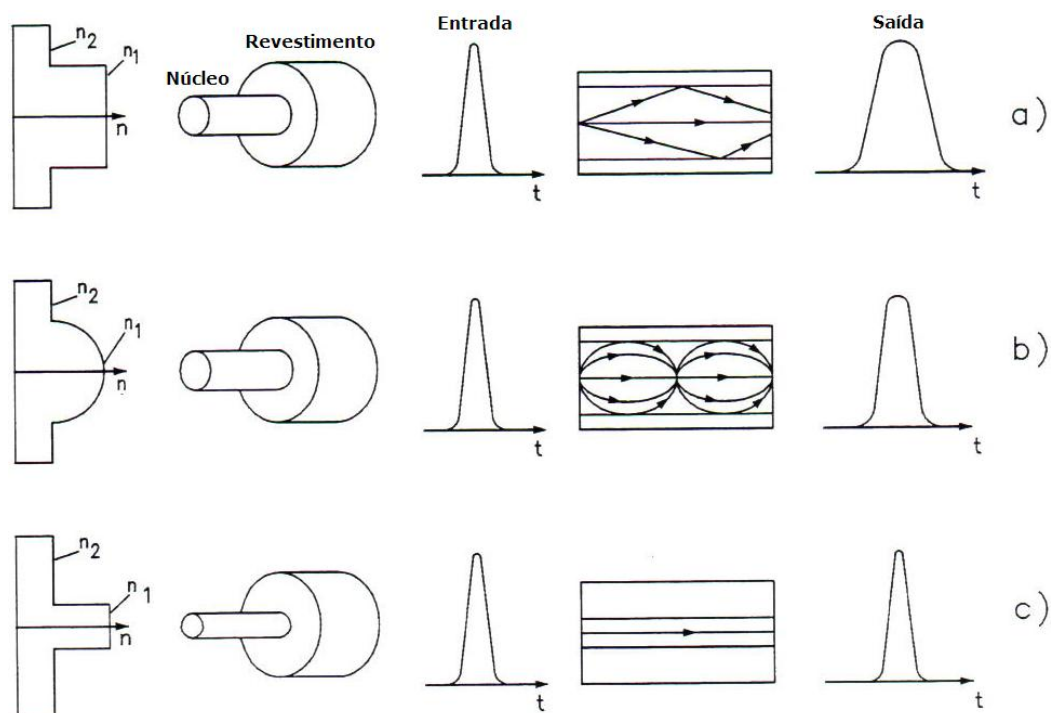


Figura 962.6 – Perfil do índice de refração e Dispersão Modal.

- a) Fibra multimodal Índice Degrau; b) Fibra com Índice Gradual;
c) Fibra mono modo Índice Degrau.

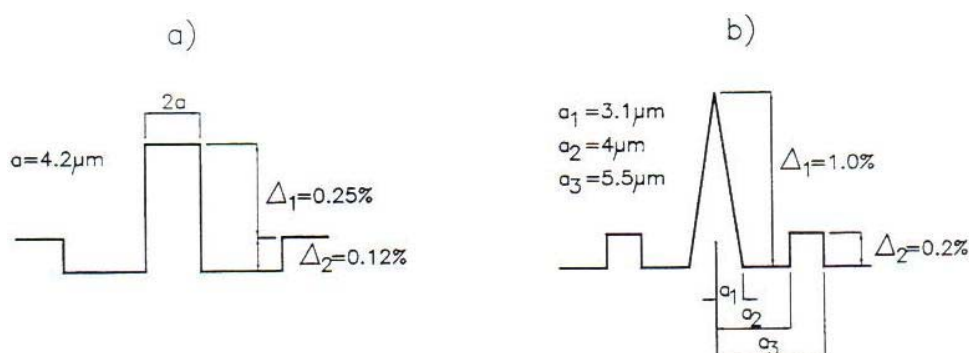


Figura 962.7 – Perfil do Índice de refração de fibras mono modo.

- a) Fibra otimizada a 1300 nm (Perfil da cobertura achatado); b) Fibra otimizada a 1550 nm (Fibra com dispersão modificada, perfil triangular com anel circular).

962.4 – Dispersão Cromática

Uma outra causa que provoca a extensão de um pulso quando propaga dentro de uma fibra é que o índice de refração n , e, conseqüentemente, a velocidade da luz em determinados meios depende do comprimento de onda da energia luminosa que atravessa esse meio (FIG. 962.8).

As fontes de luz comumente utilizadas não emitem uma radiação cromaticamente pura; portanto, componentes de diferentes comprimentos de onda propagam em velocidades diferentes, deste modo estendendo o pulso (FIG. 962.9). Esse fenômeno é denominado de Dispersão Cromática – *Chromatic Dispersion* (ou Dispersão Material – *Material Dispersion* ou Dispersão Espectral – *Spectral Dispersion*).

A *Dispersão Cromática* é expressa em ps/nm.km. Por exemplo, se uma fibra for submetida a uma dispersão de 14 ps/nm.km e a fonte de luz tem um espectro de 70 nm, o sinal será estendido, aproximadamente, em 1 ns a cada quilômetro da fibra. Certamente, a *Dispersão Cromática* pode ser minimizada completamente pelo emprego de fontes com espectro mais estreito, como, por exemplo, os Diodos a Laser (Lição 963).

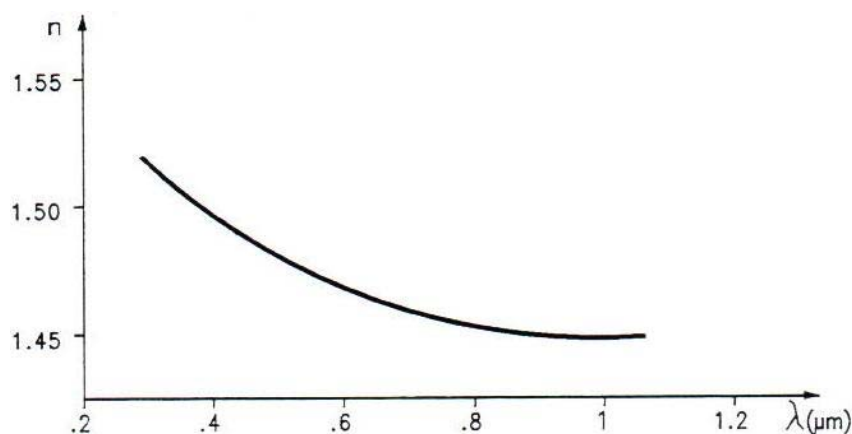


Figura 962.8 – Variação do índice de refração versus o comprimento de onda.

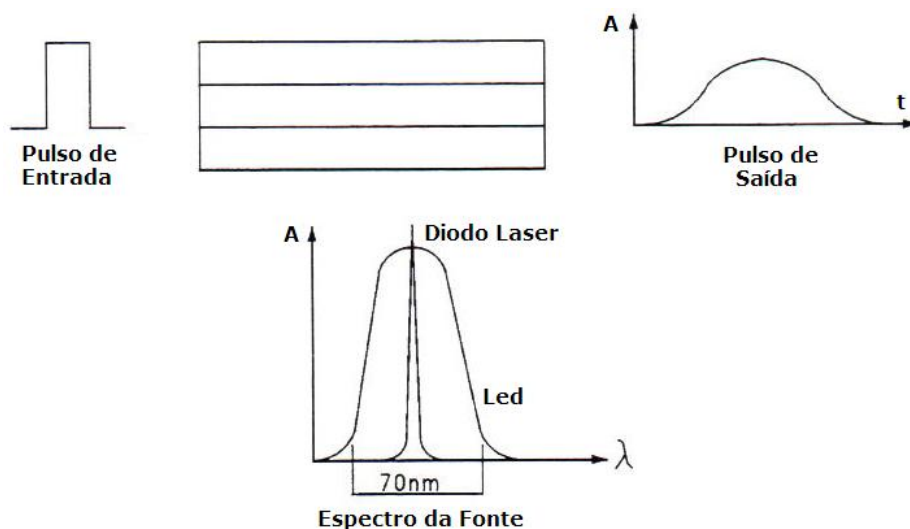


Figura 962.9 – Expansão do pulso devido a Dispersão Cromática.

962.5 - Atenuação

Quando a luz atravessa um meio absorvente, como no caso das fibras ópticas, a energia luminosa diminui quando a distância aumenta. A perda em um determinado comprimento da fibra (Atenuação) é expressa pela relação entre a potência entrando em uma das extremidades da fibra (P_{IN}) e a potência de saída na extremidade oposta (P_{OUT}). A atenuação é normalmente medida em decibel:

$$Att(dB) = 10 \log(P_{OUT} / P_{IN})$$

[962.7]

Ela pode variar de alguns dB/m, para as fibras plásticas, a frações de dB/km, para as fibras de vidro.

Atenuação e Comprimento de onda

A atenuação do sinal luminoso devido à fibra depende do comprimento de onda e do material na qual a fibra foi construída. Nas fibras de vidro as causas principais da atenuação são as Perdas por Absorção – *Absorption Losses* e as Perdas por Espalhamento – *Scattering Losses*. A combinação destas perdas permite traçar as curvas de atenuação intrínseca que são apresentadas na FIG. 962.10. Observe, também, a FIG. 962.11 que apresenta a curva de atenuação para uma fibra de plástico.

Perdas por Absorção

Enquanto os fótons da luz tem certa quantidade de energia, os átomos do vidro do núcleo (SiO_2) absorvem parte desta energia. Esse fenômeno depende do comprimento de onda e existem zonas de absorção diferentes, ocorrendo no espectro infravermelho e no espectro ultravioleta (FIG. 962.10). Além disso, durante o processo químico de fabricação do vidro, várias impurezas metálicas ficam presas no núcleo, somando a essas impurezas existem, também, alguns íons OH^- que provocam picos de atenuação para certos valores de comprimento de onda.

Perdas por Espalhamento

Elas existem devido à estrutura granular (a nível de microscópio) do material que as fibras são construídas. Essas estruturas incluem alguns centros de espalhamento, sendo pontos materiais que espalham a radiação em todas as direções, inclusive no sentido oposto. Esse fenômeno é denominado de Espalhamento ou dispersão de Rayleigh – *Rayleigh Scattering* ou Espalhamento pelo Material – *Material Scattering*.

Outras perdas

Em um link de fibra óptica, outras perdas podem ocorrer devido aos loops (curvas) estreitos na trajetória de um cabo óptico (Perdas pela Curvatura - *Bending Losses*), ou pelas junções de mais de um trecho da fibra. Certamente elas não são perdas intrínsecas da fibra, mas depende da torção na construção do cabo.

Janelas

Como mostrado na curva de atenuação das fibras de vidro (FIG.962.10), existem três regiões de comprimentos de onda com valores mínimos de atenuação. Essas regiões são denominadas de Janelas – *Windows*:

- Primeira janela, entre 800 e 900 nm;
- Segunda janela, em torno de 1330 nm;
- Terceira janela, em torno de 1550 nm.

Esses valores são de comprimentos de onda na qual a fibra de vidro são comumente empregada; contudo, as fontes e os detectores devem, respectivamente, atingir suas potência e sensibilidade máximas para esses comprimentos de onda. Ao contrário, as fibras de plástico normalmente são empregadas em 660 nm e, muito raramente, na primeira janela.

962.6- Largura de Faixa

A largura de faixa de uma fibra óptica está diretamente relacionada com o fenômeno de espalhamento analisado anteriormente.

Os efeitos do espalhamento podem ser descrito em relação ao tempo ou em função da frequência. De fato, o atraso pelo espalhamento no tempo de propagação dos raios de luz dentro da fibra além de afetar a função de transferência também afeta a faixa passante.

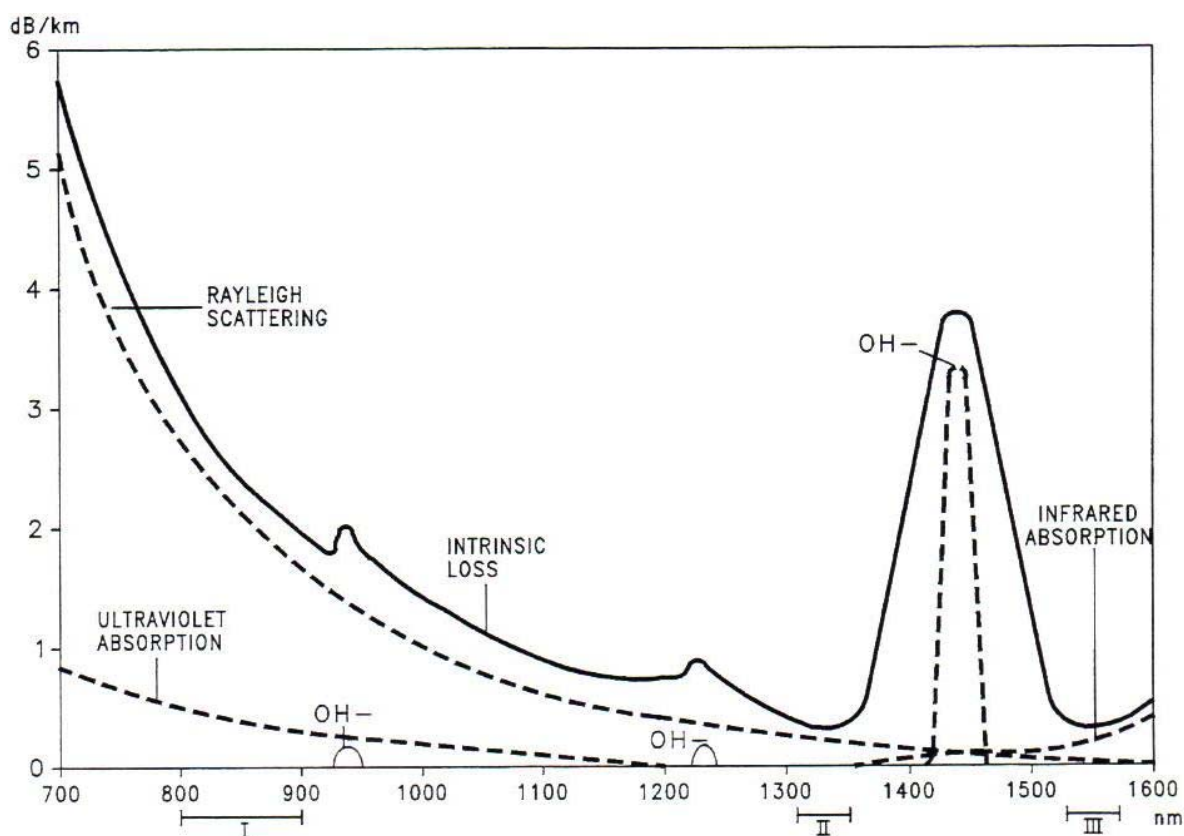


Figura 962.10 – Curva de atenuação típica para fibras de vidro mono modo.

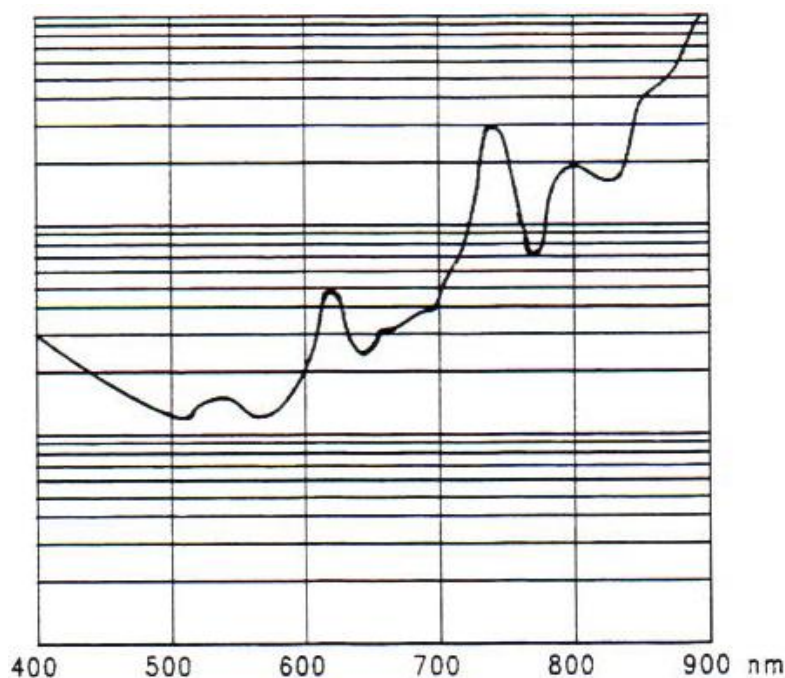


Figura 962.11 – Curva de atenuação típica para fibras de plástico.

A função de transferência é a relação entre as amplitudes dos sinais de saída e de entrada de uma fibra em função do comprimento da fibra, da mesma forma que varia a modulação em frequência da fonte óptica (FIG. 962.12). A definição convencional afirma que a largura de faixa – B_w – é o valor de frequência correspondente a um nível de saída 3 dB menor em relação ao valor máximo. A função de transferência também depende do comprimento de onda da luz, contudo existem fibras com a largura de faixa otimizada para operar em uma determinada zona do espectro de frequência.

Nas fibras o aumento do comprimento proporciona um estreitamento na faixa porque os atrasos devido ao espalhamento são ampliados. Por esta razão, a faixa é inversamente proporcional ao comprimento da fibra; assim a largura de faixa é expressa em MHz (ou GHz) por unidade de comprimento (MHz.hm ou GHz.km).

Por exemplo, uma fibra com: $Bw = 1000 \text{ MHz.km}$ será capaz de trafegar sinais até 1000 MHz se seu comprimento for igual a 1 km e de até $1000/5 = 200 \text{ MHz}$ se o comprimento da fibra for igual a 5 km.

Valores típicos de largura de faixa são:

- 10 – 100 GHz.km, para fibras mono modo;
- 300 – 3000 MHz, para fibras mono modo;
- 10 – 30 MHz, para fibras multimodo índice degrau e fibras de plástico.

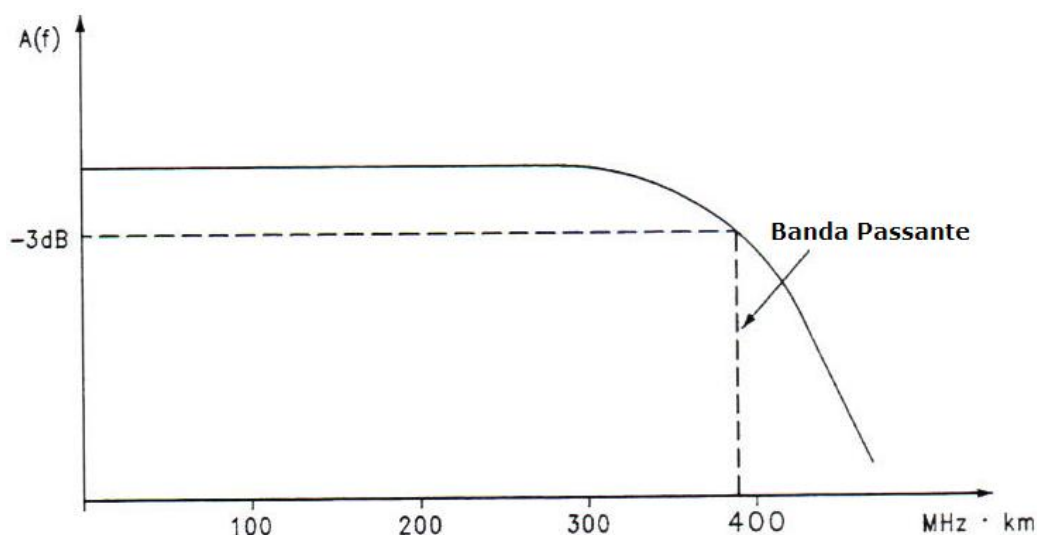


Figura 962.12 – Função de transferência de uma fibra.

962.7- Tabela sumário das fibras ópticas

Esta tabela resume alguns dados típicos das fibras de vidro e de plástico.

Fibra	Dimensões núcleo / casca [μm]	NA	Atenuação	Dispersão Modal	Faixa MHz.km	Aplicações
Plástica Índice Degrau	500/530 980/1000	0,5 – 0,6	0,2 dB/m (660 nm)	Muito alta	10	Transmissões analógicas e de dados com taxa média de (10Mb/s) em distâncias curtas (< 200 m). Telemetria. Comprimento de onda igual a 660 nm
PCS (Sílica Revestida de Plástico) Índice Degrau	200/380 600/750	0,4 – 0,5	10 db/km (660 nm)	Alta	20	Transmissões analógicas e de dados com taxa média (10 Mb/s) em distâncias curtas (<2 km). Telemetria. Comprimento de onda igual a 660 nm.
Vidro Índice Degrau	100/140 200/230	0,3 – 0,4	3 dB/km (820 nm)	Média	50	Transmissões analógicas e de dados com taxa média (10 Mb/s) em médias distâncias. Redes locais. Comprimento de onda igual a 820 nm.
Índice Gradual	50/125 62,5/125 85/125	0,2 – 0,3	3 dB/km (820 nm) 1 dB/km (1330 nm)	Baixa	1,0 GHz.km	Transmissões de vídeo e dados com altas taxas (200 Mb/s) em médias distâncias (<50 km). Redes locais. Comprimento de onda igual a 1330 nm.
Mono Modo	8 – 10/125	<0,1	0,4 dB/km (1330 nm) 0,25 dB/km (1550 nm)	Muito baixa	10 GHz.km	Transmissões digitais com taxas muito alta (Gb/s) em longas distâncias (<400 km). Comprimentos de onda de 1330 nm e 1550 nm.

962.8- Características das fibras que acompanham o cartão

Cabo de fibra óptica #1

- Comprimento: 1,5 m
- Tipo de fibra: plástica, índice degrau
- Diâmetro: 1000 μm (cobertura do núcleo)
- Atenuação: veja FIG. 962.13
- Abertura numérica: 0,46
- Ângulo de aceitação: 55°

Cabo de fibra óptica #2

- Comprimento: 5 m
- Outras características: semelhante a do cabo #1

Cabo de fibra óptica #3

- Comprimento: 3 m
- Tipo de fibra: vidro, índice degrau
- Diâmetro: 200/230 μm (núcleo/cobertura do núcleo)
- Atenuação: $< 7 \text{ dB/km}$ (820 nm)
- Abertura numérica: 0,35
- Ângulo de aceitação: 20°
- Faixa passante: 20 MHz.km

Cabo de fibra óptica #4

- Comprimento: 3 m
- Tipo de fibra: vidro, índice gradual
- Diâmetro: 50/125 μm (núcleo/cobertura do núcleo)
- Atenuação: < 3,5 dB/km (820 nm); 1,5 dB/km (1330 nm)
- Abertura numérica: 0,2
- Ângulo de aceitação: 11°
- Faixa passante: 600 MHz.km

Cabo de fibra óptica #5

- Comprimento: 3 m
- Tipo de fibra: vidro, mono modo
- Diâmetro: 10/125 μm (núcleo/cobertura do núcleo)
- Atenuação: <0,4 dB/km (1330 nm); < 0,3 dB/km (1550 nm)
- Abertura numérica: < 01
- Ângulo de aceitação: 5°
- Faixa passante: 5 GHz.km

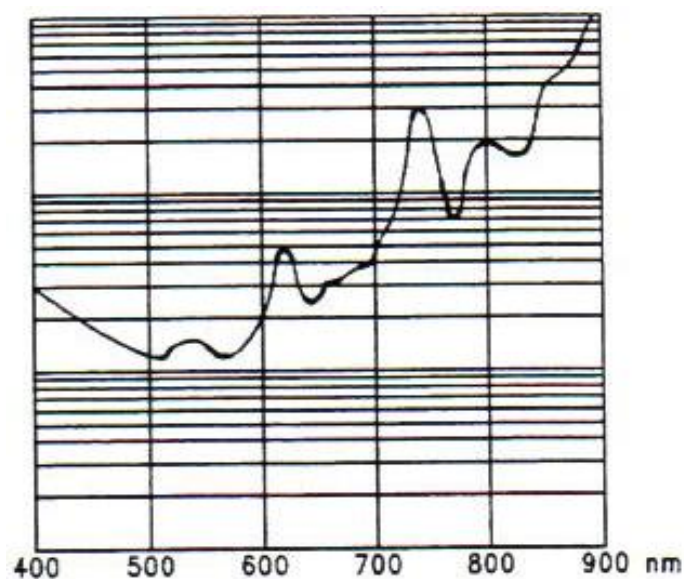


Figura 962.13 – Curva de atenuação de uma fibra óptica de plástico.

962.9 - Exercícios

FIP – Entre com o código da lição: 962.

Q1 – A Dispersão Modal é, principalmente, devida:

Grupo

A B

- 1 4 Ao comprimento de onda da fonte óptica.
- 2 3 Ao fotodetector.
- 3 1 À fibra.
- 4 2 À largura de faixa da fonte óptica.

Q2 – Qual é o efeito da Dispersão Modal?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 2 | Estreitamento do pulso recebido. |
| 2 | 4 | Atraso na recepção do pulso transmitido. |
| 3 | 1 | Expansão do pulso recebido e, conseqüentemente, aumento da faixa passante da fibra. |
| 4 | 3 | Expansão do pulso recebido e, conseqüentemente, redução da faixa passante da fibra. |

Q3 – Qual das seguintes alternativas indica os valores típicos para a Dispersão Modal e a Largura de faixa de uma fibra?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|------------------------------|
| 1 | 2 | 10 ns (nonosegundos); 5 GHz. |
| 2 | 3 | 0,1 ns/km; 700 MHz/km. |
| 3 | 4 | 0,1 s.km; 700 MHz.km. |
| 4 | 1 | 0,1 ns/km; 700 MHz.km. |

Q4 – Uma fibra óptica tem uma largura de faixa de 50 MHz.km, e será utilizada para transmitir um sinal com frequência de 16 MHz em um link de 10 km de comprimento. Qual das afirmativas está correta?

Grupo

A B

- 1 4 O link deve operar problemas.
- 2 3 O link não vai operar, porque a atenuação da fibra é muito alta.
- 3 2 O link não vai operar, porque a faixa total para esse comprimento de fibra óptica é igual a $10 / 50 = 0,5$ MHz e não suficiente para um sinal de 16 MHz.
- 4 1 O link não vai operar, porque a faixa total para esse comprimento de fibra óptica é igual a $50 / 10 = 5$ MHz e não suficiente para um sinal de 16 MHz.

Q5 – A Dispersão Cromática é, principalmente, devido:

Grupo

A B

- 1 3 Ao tempo de resposta da fonte óptica.
- 2 1 À fibra óptica.
- 3 4 A largura do espectro da emissão da fonte óptica. Esse efeito é oposto àquele da Dispersão Modal.
- 4 2 A largura do espectro de saída (emissão) da fonte óptica. Esse efeito é análogo àquele da Dispersão Modal.

Q6 – A atenuação de uma fibra ótica:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 2 | Depende do tipo de fibra, sendo constante em relação às variações do comprimento de onda. |
| 2 | 3 | Não depende do tipo de fibra. |
| 3 | 4 | Depende do tipo de fibra, e varia em relação às variações do comprimento de onda. Os valores mínimos de atenuação são denominados de Janelas – Windows (1ª janela entre 600 e 700 nm, 2ª janela entre 700 e 1300 nm, 3ª janela entre 1300 e 1600 nm). |
| 4 | 1 | Depende do tipo de fibra, e varia em relação às variações do comprimento de onda. Os valores mínimos de atenuação são denominados de Janelas – Windows (1ª janela entre 800 e 900 nm, 2ª janela em torno de 1300 nm, 3ª janela em torno de 1550 nm). |

Q7 – As fibras de índice gradual apresentam as seguintes características típicas:

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 2 | Atenuação de 3 dB/m (820 nm); largura de faixa de 50 MHz.km; dimensões 50/125 µm; elas são utilizadas para a transmissão analógicas e de dados com uma taxa média (10 Mb/s) em curtas distâncias (<200 m). |
| 2 | 3 | Atenuação de 0,2 dB/m (660 nm); largura de faixa de 10 MHz.km; dimensões 980/1000 µm; elas são utilizadas para a transmissão analógicas e de dados com uma taxa média (10 Mb/s) em curtas distâncias (<200 m). |
| 3 | 4 | Atenuação de 3 dB/km (820 nm) e de 1 dB/km (1330 nm); largura de faixa de 1 GHz.km; dimensões 50/125 µm; elas são utilizadas para a transmissão analógicas e de dados com uma alta taxa (200 Mb/s) em médias distâncias (<50 km). |
| 4 | 5 | Atenuação de 0,4 dB/km (1330 nm) e de 0,25 dB/km (1550 nm); largura de faixa de 10 GHz.km; dimensões 10/125 µm; elas são utilizadas para a transmissão analógicas e de dados com uma taxa muito alta (Gb/s) em longas distâncias (<400 km). |
| 5 | 1 | Atenuação de 7 dB/km (820 nm); largura de faixa de 50 MHz.km; dimensões 200/230 µm; elas são utilizadas para a transmissão analógicas e de dados com uma taxa média (10 Mb/s) em média distâncias (<10 km). |

Lição 963: Acoplamentos

Objetivos:

- Descrever os métodos normalmente empregados para acoplar os elementos de um sistema utilizando fibra óptica: conectores, união por fusão; união mecânica.
- Descrever as causas da perda de potência nos acoplamentos.
- Examinar as características dos conectores ópticos.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;
- Osciloscópio

963.1 – Introdução

Unões e conectores são componentes essenciais em um link utilizando fibra óptica.

Os conectores oferecem a possibilidade de acoplamento das fontes ópticas de potência, rápido e facilmente, entre as fibras e os equipamentos do sistema.

Uniões permitem a conexão contínua entre os cabos ópticos de vários comprimentos de forma permanente. As uniões e os conectores inevitavelmente absorvem uma parte da potência do sistema, consequentemente provocando atenuações.

963.2 – Uniões

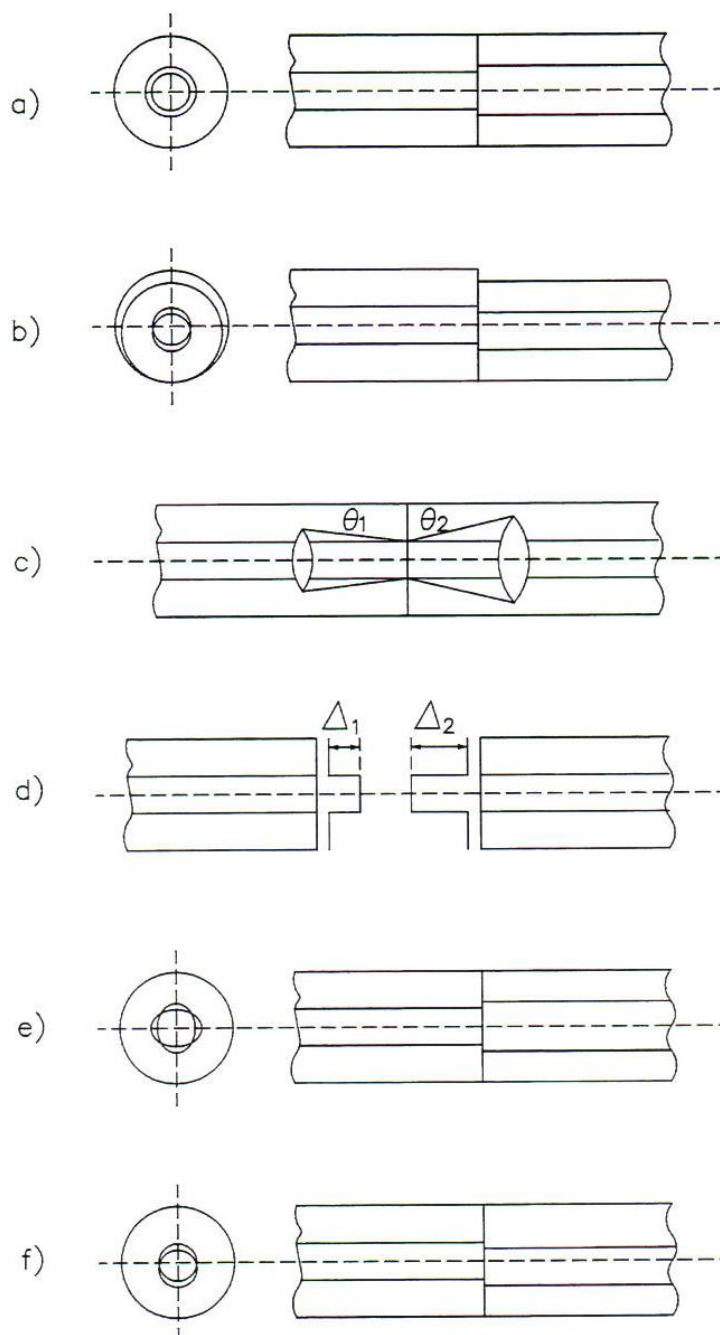
963.2.1 – Perdas nas Uniões

As perdas de potência óptica correspondentes a uma união podem, genericamente, serem classificadas como:

- Perdas intrínsecas;
- Perdas extrínsecas, externas.

As perdas intrínsecas – internas – são devidas a perda de qualidade dos parâmetros das uniões das fibras, como apresentadas, esquematicamente, na FIG 963.1.

As perdas extrínsecas – externas – são provocadas pelo desalinhamento físico das fibras ópticas nos pontos de junção, devido às técnicas e aos dispositivos de união ou de junção. Existem três tipos de desalinhamentos, classificados como descrito na FIG. 963.2.



Figuras 963.1 – Perdas intrínsecas – internas – nas uniões.

a) Núcleos com diâmetros diferentes; b) Cobertura do núcleo com diâmetros diferentes; c) Aberturas numéricas diferentes; d) Índice de refração com tendências diferentes; e) Núcleo elíptico; f) Falta de concentricidade entre Núcleo e Cobertura do núcleo

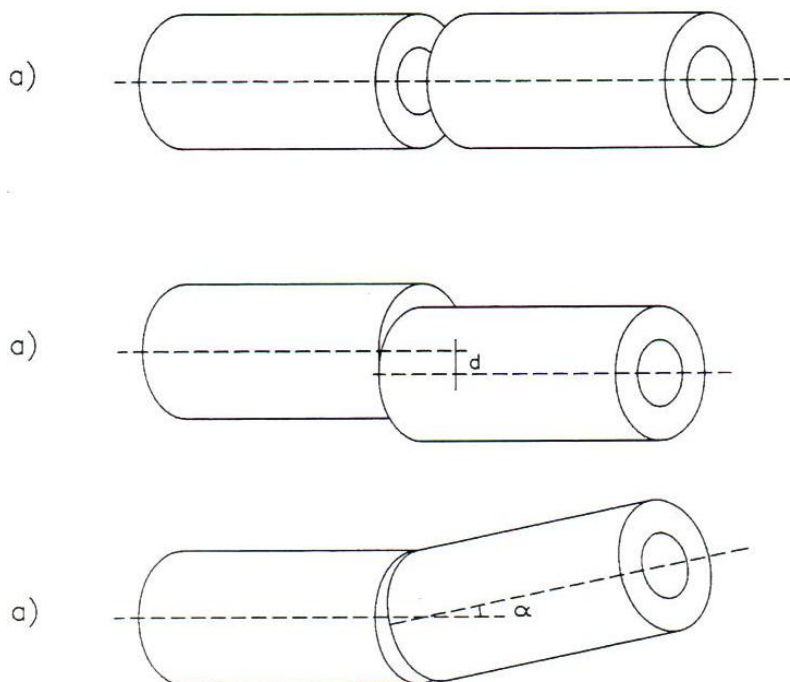


Figura 963.2 – Perdas extrínsecas – externas – nas uniões.

a) Desalinhamento axial; b) Desalinhamento lateral; c) Desalinhamento angular.

963.2.2 – União por Fusão

A união por fusão direta foi desenvolvida seguindo as etapas:

- As extremidades das fibras a serem unidas são cortadas, limpas e polidas;
- Em seguida elas são alinhadas face a face;
- Elas são aquecidas acima do ponto de fusão: desta forma as duas fibras formam um corpo único.

Três técnicas de fusão podem ser classificadas segundo a maneira como é gerado o aquecimento, que são:

- *Flame fusion* – Fusão por chama: a fonte de calor é uma micro chama obtida a partir da mistura de oxigênio e gás propano provenientes de capilaridades calibradas. Esta foi a primeira técnica de fusão desenvolvida e, atualmente, está obsoleta;
- *Laser fusion* – Fusão a laser: a fonte de calor é um laser de CO₂. Esta técnica está sendo desenvolvida e ainda não está consolidada;
- *Arc fusion* – Fusão a arco: o calor é gerado por uma corrente elétrica na forma de um arco brilhante entre dois eletrodos. Esta é a técnica mais comum, amplamente aplicada por sua simplicidade e eficiência.

As perdas provocadas por uma união por fusão dependem das dimensões do Núcleo e podem atingir valores menores do que 0,05 dB.

963.2.3 – União Mecânica

A junção ou união mecânica consiste em faceamento e bloqueio das extremidades das fibras a serem unidas. Essas uniões são mais convenientes em relação às uniões por fusão para conexões rápidas e temporárias. Várias técnicas são utilizadas para obter uma união mecânica. As uniões mais comuns são classificadas em duas famílias principais (FIG. 963.3):

- *Capillary splices* – Uniões capilares: elas consistem em um tubo de alinhamento rijo com um furo cujo diâmetro é igual àquele da fibra óptica;
- *Grooved splices* – Uniões sulcadas ou com ranhuras: o elemento de alinhamento dessa união consiste de ranhuras no formato de um V, esculpida em uma placa de metal, plástico, silicone, cerâmica ou em outro tipo de material. O acoplamento consiste em juntas as extremidades das fibras e, em seguida, cobertos por uma cola com uma resina que também

atua como um adaptador de índices; finalmente as extremidades da união são fixadas e protegidas com um cobertura.

As perdas devido a esse mecanismo de junção dependem das dimensões do Núcleo e podem atingir valores menores do que 0,2 dB.

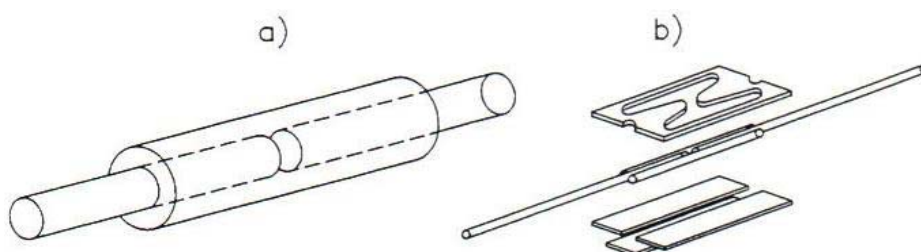


Figura 963.3 – Uniões mecânicas.

a) capilaridade; b) sulcada ou com ranhuras.

963.3 – Conectores

Conectores são dispositivos que unem duas fibras ópticas, ou uma fibra óptica a uma fonte ou a um detector, de maneira fixa, mas não de forma permanente. O sistema de conexão pode consistir de um conector macho (aplicado à extremidade de uma fibra) e um elemento fêmea (ou receptáculo montado em um equipamento, ou diretamente em fontes e detectores), ou de dois conectores macho ligados através de um adaptador dupla fêmea.

Existem conectores para fibras multimodos e conectores para fibras mono modo. É óbvio que um nível maior de precisão mecânica é exigida para os conectores do segundo tipo, como as dimensões do núcleo das fibras mono modo são menores e, por isso, torna-se necessário minimizar os desalinhamentos das fibras faceadas pelos mesmos conectores.

As perdas causadas por um conector são devidas às mesmas razões analisadas anteriormente pelas uniões. Elas dependem do tipo de conector e pode atingir um valor médio iniciando em 0,5 dB (conector bicônico, conector ST) até, aproximadamente, 1 dB (conectores SMA).

Existem vários tipos de conectores desenvolvidos por diferentes fabricantes, ou resultante da evolução dos conectores já existentes. Os conectores mais comuns são: ST, SMA, NTT-FC, NTT-PC e conectores bicônicos. Fibras de plástico oferecem a possibilidade do uso de um tipo de conector desenvolvido pela Hewlett-Packard, conhecido como conector *Snap_In* HP (FIG. 963.5).

Estrutura

Um conector comum para fibras ópticas consiste principalmente de quatro componentes (FIG. 963.4):

- *The ferrule* – virola ou ponteira: esse elemento do conector será inserido em um receptáculo. Sua seção frontal é facetada pela extremidade da fibra óptica. Alguns conectores (ST, SMA906, NTT FC/PC, etc.) tem uma ponteira reta, outros conectores (SMA906) tem uma ponteira com degrau e, outros (conectores bicônicos) uma ponteira cônica.
- *A porca de acoplamento*, que é empregada para fixar o conector firmemente ao receptáculo. Ela pode ser:
 - o *Do tipo baioneta* (conectores ST, FC, etc.): ela é inserida dentro das guias do receptáculo;
 - o *De rosca*: (SMA, conectores bicônicos, etc.): ela é parafusada na parte rosqueável do receptáculo.
- *O corpo posterior*, na qual a fibra óptica e o revestimento do cabo são fixados.

- A *capa*, que bloqueia a cobertura do cabo na parte posterior do corpo do conector

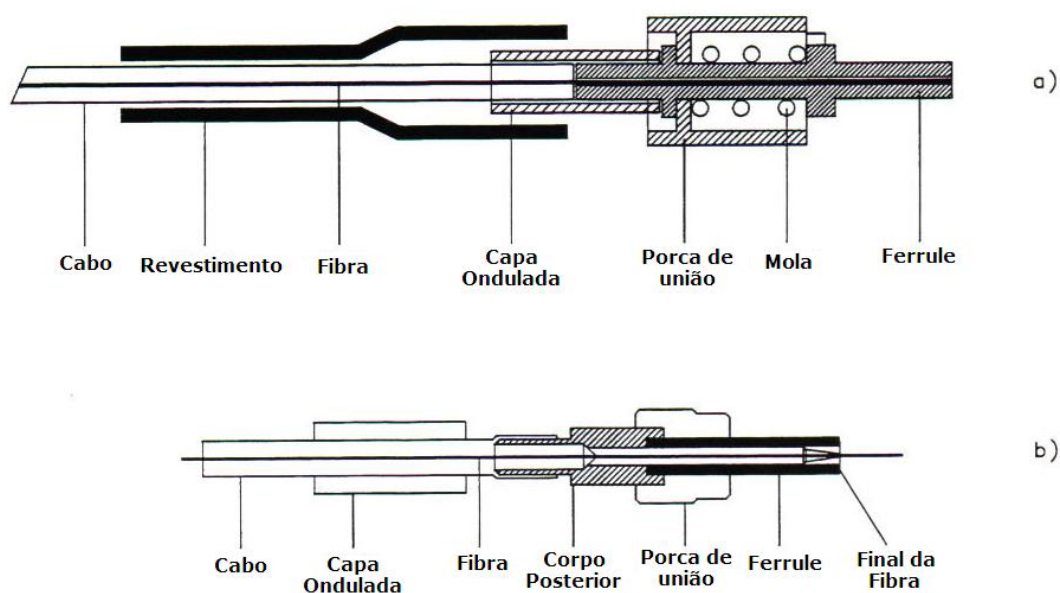


Figura 963.4 – Estrutura dos conectores. a)ST e b) SMA.

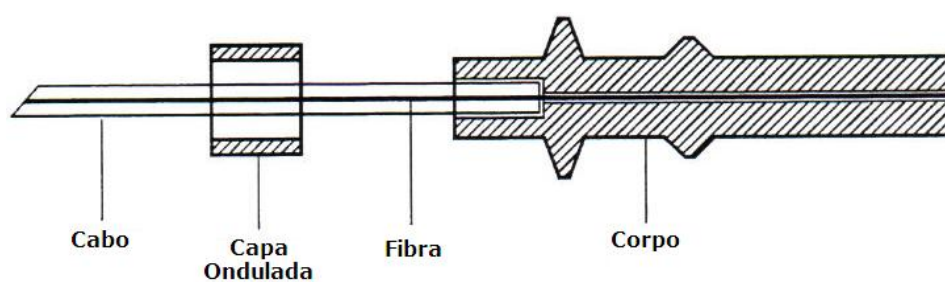


Figura 963.5 – Estrutura de um conector Snap_IN HP.

963.4 – Exercícios

UTF1 – Desconecte todos os *jumper*s.

FIP – Entre com o número do código da lição: 963.

963.4.1 – Atenuação na fibra

- Alimente o cartão.
- Desconecte o *jumper* J13 e faça as seguintes conexões J7c – J9b – J10b – J11 – J12b, de modo que o circuito possa ser arranjado como apresentado na FIG. 963.6. Essa configuração inclui o LED e o Fotodiodo de 660 nm; além disso, um sinal digital alternando (0/1) será aplicado à entrada do *Digital Driver* – Driver Digital (TP20);
- Conecte o LED ao Fotodiodo através do cabo #1 (fibra óptica plástica de 1,5 m), do adaptador ST-ST e o cabo #6;
- Ajuste o *trimmer Bias* – Polarização (P4) para sua posição intermediária. Conecte J15b. Utilizando-se de um osciloscópio, observe a forma de onda no ponto TP24 (tensão detectada pela junção do “fotodiodo + o amplificador de trans-impedância”);
- Anote a amplitude V_{OUT1} da onda quadrada detectada;
- Troque o cabo #1 (fibra óptica Plástica de 1,5 m) pelo cabo #2 (fibra óptica plástica de 5 m), e meça a nova amplitude V_{OUT2} do sinal recebido, no ponto TP24.

Q1 – O que se pode verificar?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | A amplitude não variou. |
| 2 | 3 | A amplitude aumentou, por causa do comprimento maior da fibra. |
| 3 | 2 | A amplitude diminuiu por causa da maior atenuação do sinal óptico devido ao maior comprimento da fibra. |
| 4 | 1 | A amplitude diminuiu, por causa da abertura numérica menor para a fibra #2. |

Nota:

Se a potência que entra na fibra (fornecida pelo LED a 660 nm) pode ser considerada constante, um sinal com amplitude igual a V_{OUT1} (proporcional à potência óptica recebida) está disponível na saída da fibra de 1,5 m enquanto que uma amplitude V_{out2} está disponível na saída da fibra de 5 m. A relação V_{out2}/V_{out1} deve indicar a atenuação proporcionada pelo comprimento adicional de 3,5 m, para um sinal de 660 nm.

- Calcule a relação V_{out2}/V_{out1} e anote seu valor.

Q2 – O valor encontrado para a relação V_{out2}/V_{out1} está na faixa de

Grupo

A B

1 2 1,5 a 2.

2 4 0,7 a 0,9.

3 1 0,1 a 0,2.

4 3 4 a 6.

- Dobre, **LEVEMENTE**, a conexão da fibra óptica (cabo #6) **COM EXTREMO CUIDADO** e observe o sinal no ponto TP24.

Q3 – O que foi observado?

Grupo

A B

1 3 A amplitude não variou.

2 1 A amplitude diminui por causa das perdas pela curvatura da fibra.

3 4 A amplitude aumenta por que a abertura numérica aumenta.

4 2 A amplitude diminui por causa do desalinhamento entre a fonte e a fibra.

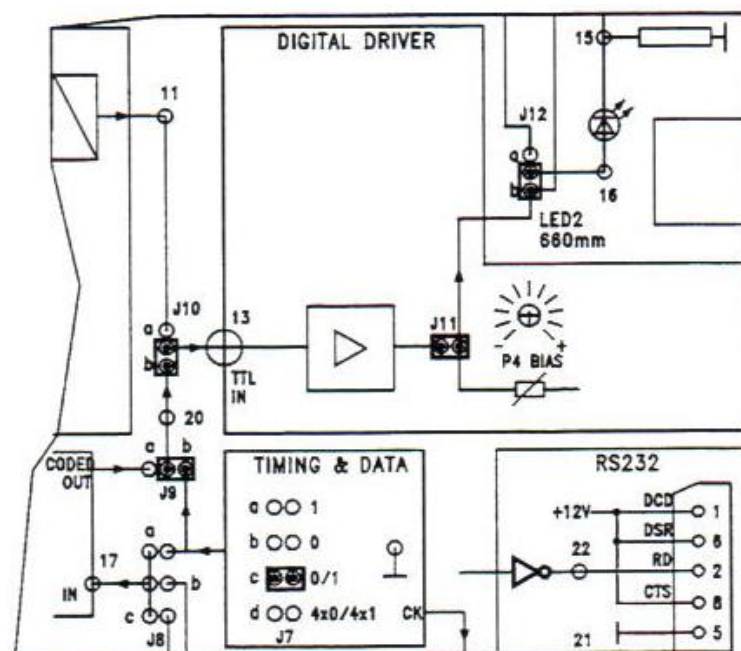


Figura 963.6 – localização do *Digital Driver* na placa.

963.4.2 – Perdas pelo Acoplamento

- Mantenha as mesmas condições utilizadas anteriormente (LED e Fotodiodo a 660 nm conectados através do cabo de fibra óptica #2);
- Observe a forma de onda no ponto TP24, utilizando um osciloscópio;
- Solte o conector da fibra inserido no adaptador ST-ST e, gradualmente, mova-o retirando-o desse adaptador (e, conseqüentemente, o segundo conector ST inserido no adaptador);
- Observe que a amplitude do sinal recebido diminui e, também, depende do ângulo na qual o conector foi inserido no adaptador;
- Solte e mova também o conector da fonte e do detector, ao mesmo tempo observe que a amplitude do sinal recebido sempre decresce.

963.4.3 – Atenuação na fibra em função do comprimento de onda

- Remova o *jumper* J12be e feche o *jumper* J13b, de forma a utilizar o LED e o Fotodiodo a 820 nm;
- Conecte o LED 1 ao Fotodiodo PD1 utilizando o cabo de fibra óptica #1 (fibra plástica de 1,5 m);
- Conecte o jumper J15a e observe a forma de onda no ponto TP23;
- Anote a amplitude V_{out3} da onda quadrada detectada;
- Troque o cabo de fibra óptica #1 (fibra plástica de 1,5 m) pelo cabo de fibra óptica #2 (fibra plástica de 5 m) e meça a nova amplitude V_{OUT4} do sinal recebido, em TP23.

Nota:

Se a potência que entra na fibra (fornecida pelo LED a 820 nm) é mantida constante, um sinal com amplitude igual a V_{OUT3} (proporcional à potência óptica recebida) está disponível na saída da fibra de 1,5 m enquanto que uma amplitude V_{out4} está disponível na saída da fibra de 5 m. A relação V_{out4}/V_{out3} deve indicar a atenuação proporcionada pelo comprimento adicional de 3,5 m, para um sinal de 820 nm.

- Calcule a relação V_{out4}/V_{out3} e anote seu valor.

Q4 – O valor encontrado para a relação V_{out4}/V_{out3} está na faixa de

Grupo

A B

1 4 1,5 a 2.

2 4 0,9 a 0,95.

3 1 0,1 a 0,3.

4 3 4 a 6.

Q5 – Considerando o valor da relação V_{out2}/V_{out1} previamente medido utilizando um comprimento de onda de 660 nm, pode-se inferir que:

Grupo

A B

1 2 A fibra plástica proporciona uma maior atenuação na frequência de 820 nm do que em 1330 nm.

2 3 A fibra plástica proporciona uma maior atenuação na frequência de 820 nm do que em 660 nm.

3 4 A atenuação é a mesma na frequência de 660 nm e de 820 nm.

4 5 A fibra plástica proporciona uma atenuação maior para a forma de onda em 820 nm do que em 660 nm.

5 1 A fibra plástica proporciona uma atenuação maior para a forma de onda em 660 nm do que em 820 nm.

963.5 – Questões

Q6 – Qual das seguintes conexões NÃO constitui um link para um sistema óptico?

Grupo

A B

- 1 3 Conector – receptáculo.
- 2 1 Conector – conector.
- 3 4 União mecânica.
- 4 2 União por fusão.

Q7 – Que tipo de link proporciona a menor perda de potência óptica?

Grupo

A B

- 1 2 A união por fusão, com perdas menores do que 0,05 dB (ela depende do diâmetro do núcleo e aumenta quando o diâmetro aumenta).
- 2 3 Um link por meio de conectores.
- 3 4 Uma união mecânica (perdas menores do que 0,01 dB).
- 4 1 A união por fusão, com perdas menores do que 0,05 dB (ela depende do diâmetro do núcleo e diminui quando o diâmetro aumenta).

Q8 – Qual é o tipo de link mais rápido de se montar?

Grupo

A B

- 1 2 Utilizando conectores.
- 2 4 Utilizando receptáculos.
- 3 1 Utilizando união mecânica.
- 4 3 Utilizando união por fusão.

Q9 – Qual dos seguintes conectores NÃO é utilizado com fibras ópticas?

Grupo

A B

- 1 5 SMA.
- 2 4 BNC.
- 3 2 FC.
- 4 1 ST.
- 5 3 Bicônico.

Q10 – Qual a parte de um conector facea a fibra óptica?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---------------------------|
| 1 | 4 | O receptáculo. |
| 2 | 3 | A parte frontal do corpo. |
| 3 | 2 | A face da ponteira. |
| 4 | 1 | A união sulcada. |

Lição 964: Fontes Ópticas

Objetivos:

- Descrever as características operacionais e os parâmetros dos LED e dos Diodos Laser utilizados como fontes ópticas para a transmissão com fibras ópticas.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;
- Multímetro

964.1 – Introdução

As fontes ópticas mais comuns são os diodos emissores de luz (LED – Light-Emitting Diode) e os diodos laser (LD – Laser Diode). Ambos os diodos podem ser empregados para gerar uma radiação em diferentes comprimentos de onda, correspondentes às janelas onde as fibras ópticas apresentam a mínima atenuação.

O diodos LED geralmente são caracterizados por uma confiabilidade boa e custo limitado, duas dimensões sobretudo são limitadas e capaz de um acoplamento muito bom com as fibras ópticas. Contudo, eles não são monocromáticos, de modo que eles proporcionam um dispersão cromática dentro da fibra.

Os diodos Laser apresentam um espectro de emissão muito estreito, tanto que sua dispersão cromática é considerada reduzida, e a potência óptica que eles podem fornecer é consideravelmente maior do que aquela fornecida pelos diodos LED. Contudo, eles são mais caros que os diodos LED e a potência que eles emitem dependem muito da variação de temperatura. Por essa razão eles devem operar em um ambiente com temperatura controlada, ou eles devem ser alimentados por um circuito APC (*Automatic Power Control* – Controle Automático de Potência) que regula a potência emitida em função da variação de temperatura.

LED

O LED é um diodo particular que emite luz através de um processo de recombinação de pares elétrons-lacunas, devido a uma polarização direta de uma junção (FIG. 964.1). A potência óptica emitida é função da corrente de alimentação direta. Os LED atuais que operam na 1ª janela são fabricados de arseneto de gálio ou de um composto ternário com alumínio (ALGaAs/GaAs -), os LED operando nas 2ª e 3ª janelas são fabricados de irídio-gálio-arseneto-fosfina (InGaAsP/InP - *indium-gallium-arsenide-phosphide*).



Figura 964.1 – Alimentação de um LED.

Parâmetros característicos

Os parâmetros mais importantes para um LED são:

Comprimento de onda de saída;

Largura espectral de saída: a falta do mono cromatismo proporciona a dispersão cromática, particularmente presente na 3ª janela. A FIG. 964.2a apresenta um diagrama típico da intensidade relativa versus o comprimento de onda para um LED operando na 2ª janela;

Potência óptica de saída: ela varia em algumas dezenas de μW , e depende da corrente direta de alimentação. A FIG. 964.2b mostra um diagrama típico da potência emitida em função da corrente de alimentação. Geralmente os fabricantes indicam a potência óptica entrando na fibra, especificando o tipo de fibra (50/125, 100/140, mono modo, etc.);

Resposta de frequência: correspondendo a um filtro do tipo passa-baixa, ela é detectada quando um sinal modulante senoidal modifica a portadora óptica. Ela varia de algumas dezenas a poucas centenas de MHz. A FIG. 964.2c mostra uma resposta de frequência típica de um LED. Alguns fabricantes indicam a resposta a um pulso (FIG. 964.d) no lugar da resposta de frequência.

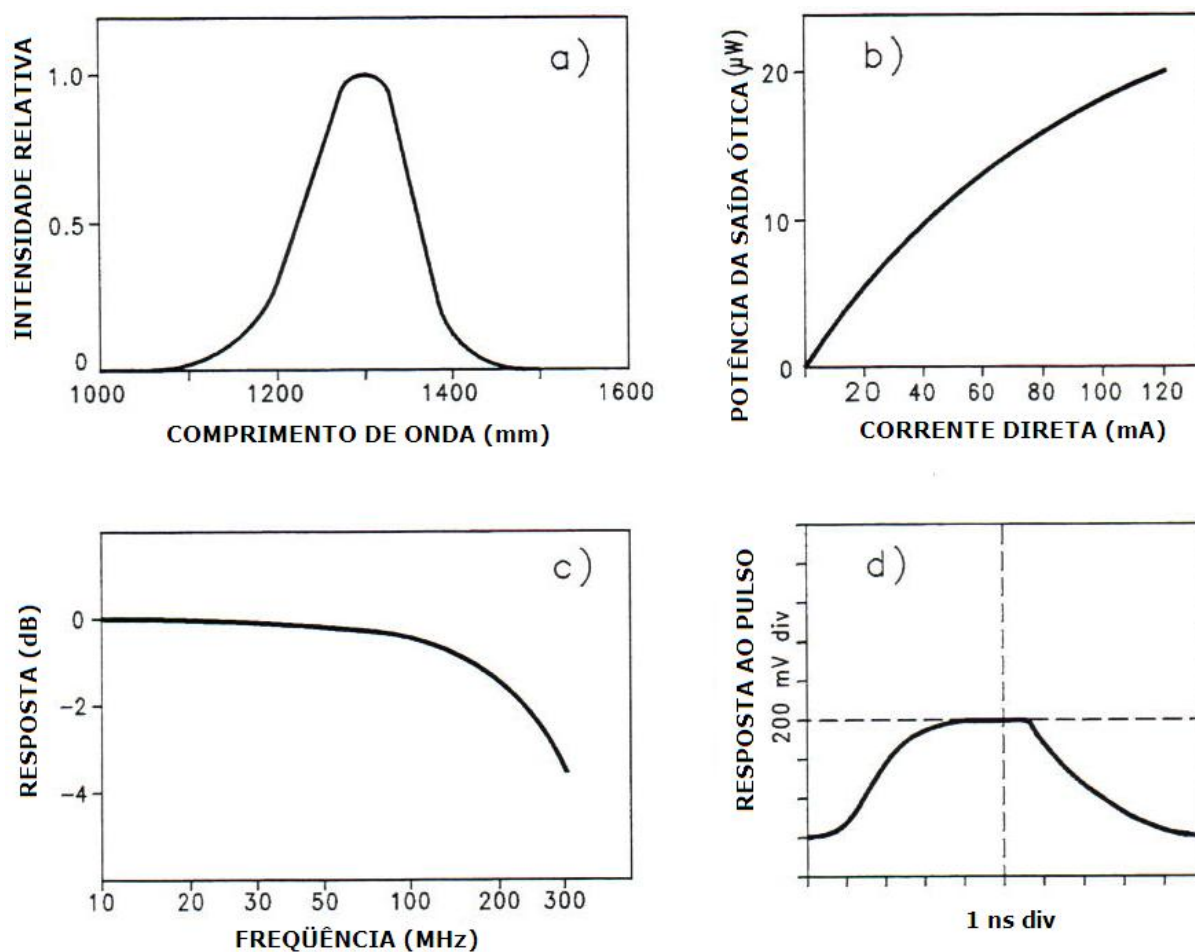


Figura 964.2 – Parâmetros característicos de um LED.

- a) Espectro de saída; b) Potência óptica de saída/corrente de alimentação;
c) Resposta de frequência; d) Resposta a um pulso.

964.3 – Diodo Laser

A recombinação elétron-lacuna não é o único método de se gerar fótons, que consiste na radiação luminosa. A própria energia de um fóton colidindo em um átomo energizado pode emitir um outro fóton: isso é também conhecido como emissão simulada – simulated emission. Esse novo fóton está em fase com o

fóton incidente e tem, aproximadamente, a mesma frequência: este é o ponto de partida para obter-se a amplificação da radiação. A operação de um diodo Laser (LD) está baseada exatamente no princípio acima mencionado. A emissão estimulada é obtida através de uma dopagem maior do que aquela utilizada para os LED, e com alguns dispositivos construtivos, como por exemplo, uma realimentação positiva iniciada pela reflexão de uma parte da luz emitida, dentro de uma zona ativa. Como o fóton incidente e o fóton emitido realmente tem a mesma frequência, o espectro de saída do Laser é muito estreito menor do que ao do LED.

Parâmetros característicos

Os parâmetros característicos dos diodos Laser são os mesmos dos LED. A FIG. 964.3 apresenta os gráficos da potência de saída e a largura espectral de um diodo Laser. Quando comparado com um diodo LED, um diodo Laser oferece as seguintes vantagens:

- Largura espectral muito mais estreita (alguns nanômetros em vez de dezenas de nanômetros);
- Potência emitida muito maior (mW em vez de μW);
- Tempo de resposta muito mais rápido (frações de ns em vez de alguns ns).

Além disso, os diodos Laser são mais sensíveis às variações de temperatura do que os LED; desta forma, eles devem operar em um ambiente com temperatura controlada e devem ser alimentados com uma corrente de polarização que varia automaticamente, a fim de regular a potência de saída. Esses circuitos são denominados de Controle Automático de Potência – *Automatic Power Control* (APC).

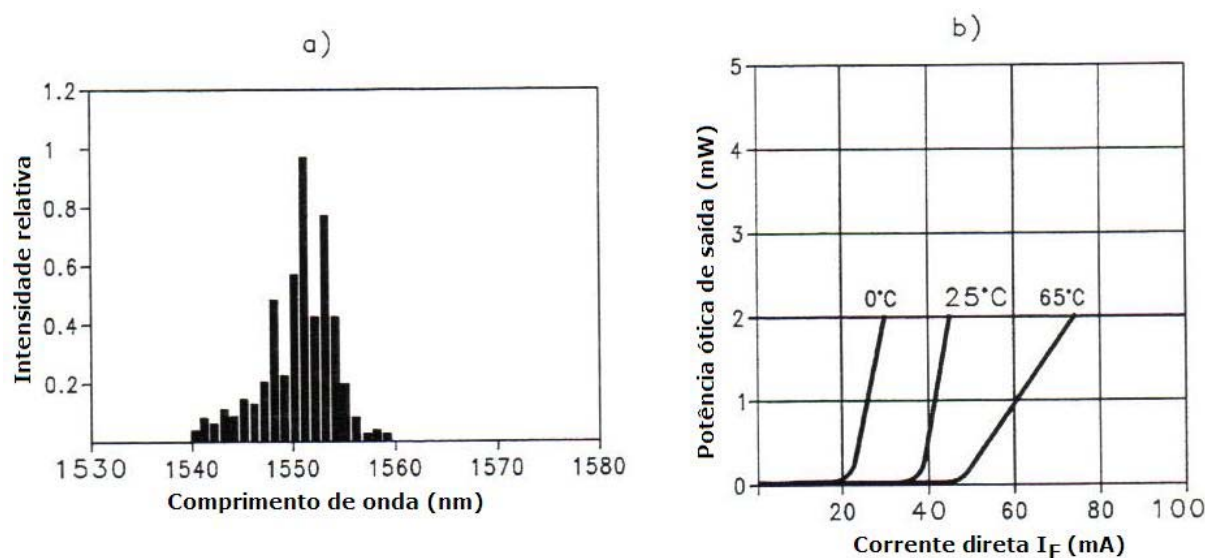


Figura 964.3 – Parâmetros característicos de um diodo Laser.

a) Espectro de saída; b) Potência ótica de saída / Corrente de alimentação.

Alimentação dos diodos Laser

O comportamento elétrico de um diodo Laser é similar àquele dos diodos LED e a potência ótica de saída depende da corrente direta através do diodo Laser. Portanto, a modulação do Laser diretamente com um sinal elétrico possibilita a construção de sistemas de comunicações empregando fibras ópticas. Por exemplo, considere a transmissão de um sinal digital (FIG. 964.4). Neste caso, o diodo Laser foi polarizado com uma corrente de polarização I_B cujo valor está em torno do início da corrente I_{TH} . A corrente I_P do pulso, devido ao sinal digital, assume um valor mínimo e um valor máximo, que corresponde à mínima e a máxima saída de energia luminosa.

Dependência com a temperatura

A curva característica Potência óptica de saída / Corrente de alimentação do diodo Laser depende estreitamente da temperatura (FIG. 964.3a). Por exemplo, a 0°C e com $I_F = 35 \text{ mA}$, a potência de saída é de 0,175 mW; com o aumento da temperatura, esse valor rapidamente diminui, se I_F é mantida constante. De fato, a 25°C, a potência de saída é de 0,075 mW e a 65°C ela é reduzida a 0 mW. Essa estreita dependência dos diodos Laser com a temperatura pode ser compensada por meio de um circuito externo que controla a corrente de polarização, tal que a potência de saída possa ser regulada com as variações de temperatura. Este circuito aumenta a corrente de polarização quando a temperatura aumenta e vice-versa. Além do mais, em alguns casos, a temperatura também pode ser regulada por meio de um sensor de temperatura e um *cooler* – dissipador (Peltier effect – Efeito Peltier) montado junto ao invólucro do diodo Laser.

APC – Automatic Power Control – Controle Automático de Potência

A FIG. 964.5 apresenta o diagrama em blocos de um circuito de Controle Automático de Potência (APC) para um sistema de transmissão de pulsos.

O sinal digital de entrada alterna o diodo Laser em ON (máxima potência de saída) e em OFF (mínima potência de saída), onde o máximo valor da potência de saída depende do circuito de alimentação. Neste mesmo invólucro do diodo Laser também inclui-se um fotodiodo de monitoração, que é empregado como um sensor de luz. A maioria da energia óptica emitida pelo diodo Laser penetra na fibra óptica (feixe principal), e uma parte mínima (feixe de monitoração) é irradiada sobre o fotodiodo (FIG. 964.6). A potência de saída do fotodiodo é um sinal elétrico proporcional à potência óptica do sinal emitido pelo diodo Laser. O circuito detector de pico que se segue fornece uma tensão direta proporcional ao pico da potência emitida pelo diodo Laser. Esse valor é comparado com uma

tensão de referência. A diferença entre esses dois valores aciona o circuito de alimentação, forçando uma variação na corrente de alimentação do diodo Laser de forma a regular sua potência máxima. Desta forma, o circuito APC regula a potência óptica de saída quando a temperatura varia. Se a temperatura eleva, a potência de saída tende a decrescer, o que também decresce a tensão fornecida pelo fotodiodo e pelo detector de pico. Assim o erro e a corrente fornecida pelo circuito de alimentação do diodo Laser aumentam. O resultado é que a potência de saída tende a aumentar, contrariando o efeito proporcionado pela variação de temperatura.

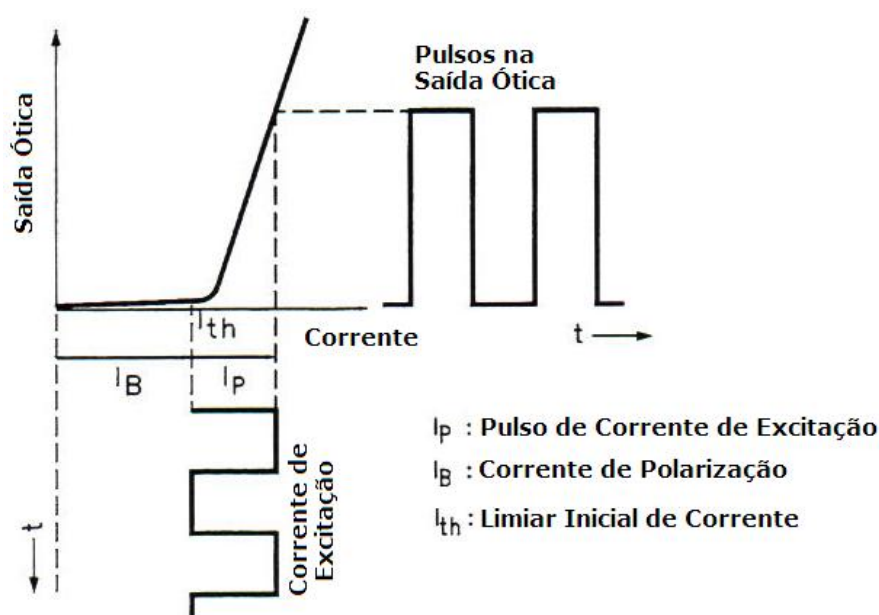


Figura 964.4 – Alimentação de um diodo Laser.

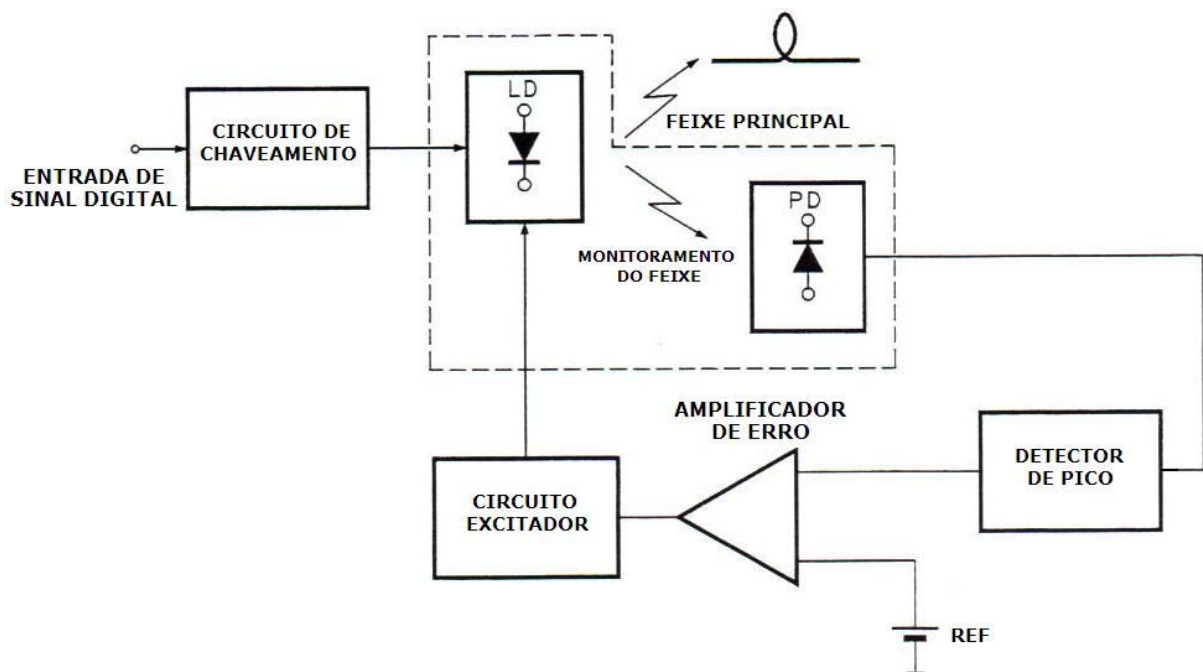


Figura 964.5 – APC – Controle Automático de Potência.

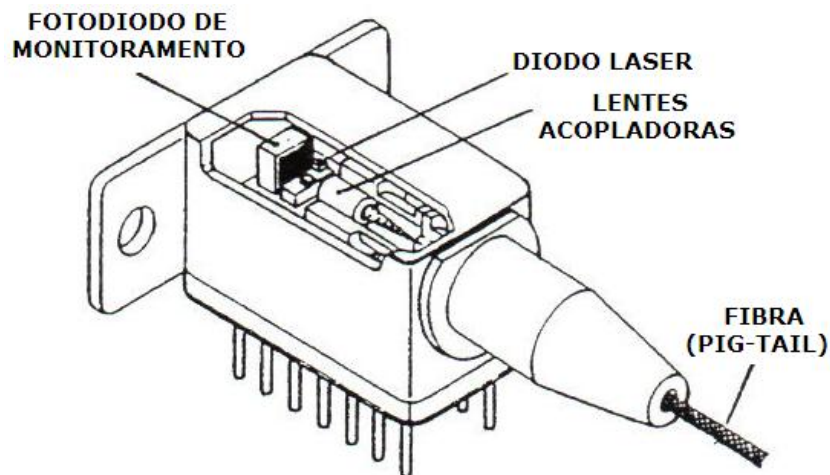


Figura 964.6 – Diodo Laser com monitoração com fotodiodo.

964.4 – Acoplamento da fonte à fibra óptica

A maior parte da radiação luminosa irradiada por uma fonte deve penetrar na fibra. Os fabricantes fornecem LED e Diodos Laser (bem como os fotodetectores explicados na próxima lição) já montados em um invólucro adequado para o acoplamento das fibras de transmissão. Existem dois tipos de montagens:

- Com receptáculo (FIG. 964.7a): a energia luminosa é conduzida por meio de lentes ou um pedaço pequeno de fibra óptica a um conector fêmea denominado receptáculo. Os fabricantes, normalmente, indicam a potência óptica que entra na fibra, especificando o tipo de fibra (50/125, 100/140, mono modo, etc.);
- Com *pigtail* – rabicho (FIG. 964.8a e 964.6): a superfície de radiação está acoplada a um pedaço de fibra óptica de aproximadamente 1 metro, denominado de *pigtail* – rabicho. Os fabricantes normalmente indicam a potência óptica de saída no *pigtail*, especificando também o tipo de fibra óptica utilizada na construção do mesmo.

No primeiro caso, a fonte é acoplada à fibra de transmissão através de conectores (um fêmea no lado da fonte e um macho na extremidade da fibra óptica) (FIG. 964.7b). No outro caso, quando um link é construído o *pigtail* é soldado diretamente na extremidade da fibra utilizada para a transmissão (FIG. 964.8b).

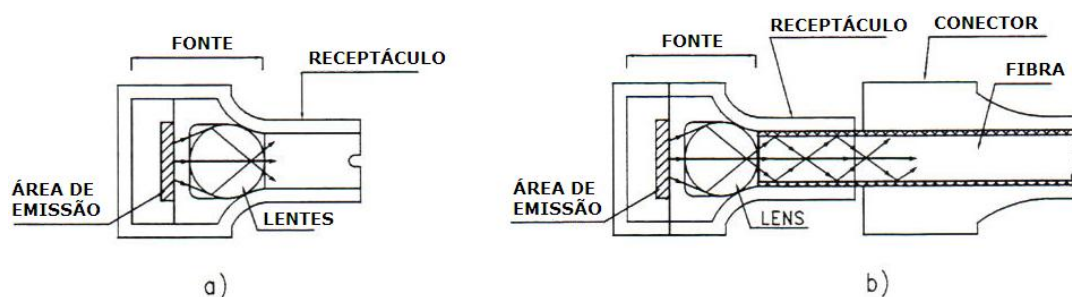


Figura 964.7 – Fontes montadas utilizando receptáculos.

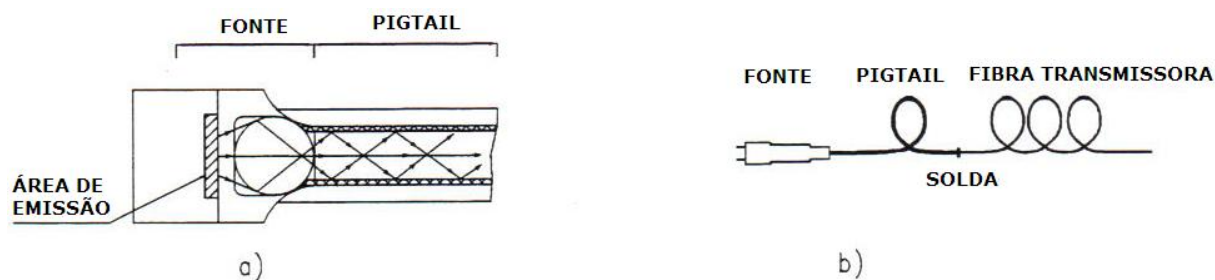


Figura 964.8 – Fontes montadas utilizando o *pigtail*.

964.5 – Tabela sumário das fontes ópticas

A tabela a seguir sumariza alguns dados típicos das fontes ópticas utilizando LED e Diodo Laser.

	LED	Diodo Laser
Potência óptica de saída	Dezenas de mW	Centenas de mW
Comprimento de onda	660 nm e 1ª e 2ª janelas (típico)	2ª/3ª janelas (típico)
Espectro de saída	Largo (dezenas de nm)	Estreito (poucos nm)
Complexidade dos circuitos	Médio / baixa	Alta
Resposta de frequência	Centenas de MHz	Dezenas de GHz
Construção	Receptáculo ou <i>pigtail</i> (na 2ª janela)	<i>Pigtail</i>
	LED	Diodo Laser
Custo	Médio (centenas de dólares)	Caro (milhares de dólares)
Aplicações	Telemetria. Transmissões analógicas e digitais com	Vídeo, redes locais de dados com transmissões

Aplicações	uma taxa média (10 Mb/s) em distâncias curtas (< 2km) utilizando fibra plástica. Comprimento de onda de 660 nm. Redes locais analógicas ou de dados com transmissões a uma taxa média (10 Mb/s) em distâncias médias (< 10 km) utilizando fibras de vidro. Comprimento de onda na 1ª janela. Vídeo, redes locais de dados com transmissões a uma taxa alta (200 Mb/s) em distâncias médias (< 50 km) utilizando fibra de vidro. Comprimento de onda na 1ª e 2ª janelas.	a uma taxa alta (200 Mb/s) em distâncias médias / longas (100 km) utilizando fibra mono modo. Comprimento de onda na 2ª e 3ª janelas. Transmissões digitais com taxas muito alta (Gb/s) em longas distâncias (< 400 km) utilizando fibra mono modo. Comprimento de onda na 2ª e 3ª janelas.
------------	---	--

964.6 – Exercícios

UTF1 – Desconecte todos os jumpers.

FIP – Entre com o código da lição: 961.

964.6.1 – Potência óptica emitida por um LED

- Alimente o cartão de prática;
- Desconecte os *jumpers* J11 – J13 e feche o *jumper* J12/b, tal que o circuito possa apresentar a montagem conforme a FIG. 964.9. Essa configuração inclui o LED de 660 nm, polarizado diretamente através do *trimmer* (P4) BIAS;
- Meça a tensão V_{10} através do resistor de $10\ \Omega$ conectado em série com o LED (entre o TP15 e o terra – GND). A corrente direta I_F no LED pode ser determinada utilizando a seguinte expressão:

$$I_F = V_{10} / 10 \quad [V_{10} \text{ em mV}, I_F \text{ em mA}]$$

Observe a intensidade de luz emitida pelo LED.

Q1 – O pode-se inferir a partir das considerações prévias?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 4 | A potência óptica emitida pelo LED aumenta quando a corrente direta diminui. |
| 2 | 3 | A potência óptica emitida pelo LED aumenta quando a corrente direta aumenta. |
| 3 | 2 | A potência óptica emitida pelo LED aumenta quando a corrente direta aumenta. |
| 4 | 1 | A potência óptica emitida pelo LED mantém-se constante. |

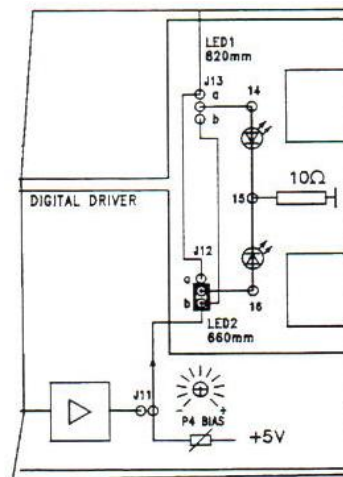


Figura 964.9 – Montagem no Cartão de Prática.

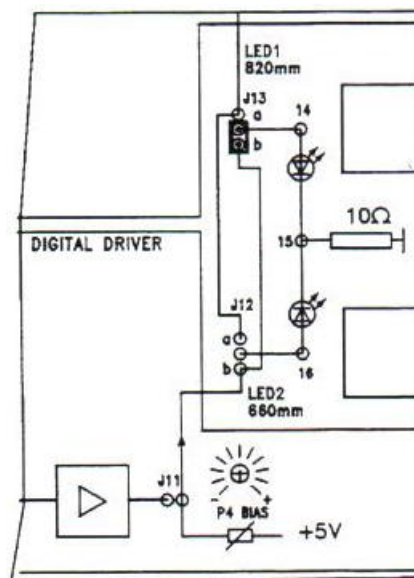


Figura 964.10 – Montagem no Cartão de Prática.

964.6.2 – Curvas características dos LED

Essas medidas só poderão ser executadas se um Medidor de Potência Óptica estiver disponível.

- Desconecte os *jumpers* J11 – J12 e feche o *jumper* J13b, de tal forma que o circuito apresente a montagem conforme a FIG. 964.10. Essa configuração inclui o LED de 820 nm, polarizado diretamente por meio do *trimmer* (P4) *BIAS*;
- Meça a tensão V_F através do LED (entre os pontos TP14 e TP15) e a tensão V_{10} através do resistor de 10 Ω conectado em série com o LED (entre os pontos TP15 e o terra – GND), utilizando um voltímetro. A corrente direta I_F através do LED pode ser determinada utilizando a seguinte expressão:

$$I_F = V_{10} / 10 \quad [V_{10} \text{ em mV}, I_F \text{ em mA}]$$

- Conecte o LED ao Medidor de Potência Óptica através do cabo #3 (fibra óptica 200/230);
- Varie o trimmer *BIAS* (P4). Meça a corrente I_F através do LED, a tensão V_F no LED e a potência óptica de saída *POUT*. Os valores medidos serão similares a aqueles indicados na tabela da FIG. 964.11a;
- Plote a curva da potência de saída do LED em função da corrente de alimentação em um gráfico utilizando os valores de corrente e potência medidos (FIG. 964.11b);
- Plote a curva da corrente de alimentação em função da tensão de alimentação em um gráfico utilizando os valores de corrente e tensão medidos (FIG. 964.11c);
- Troque o cabo #3 pelo cabo #4 (fibra 50/125) ou com o cabo #5 (fibra 10/125) e observe que as medidas de potência decrescem. Isso acontece

porque as fibras 50/125 e 10/125 tem uma abertura numérica menor e, conseqüentemente, a potência óptica entrando na fibra a partir do LED diminui.

I_F [mA]	V_F [mV]	P_{out} [dBm]
60	1900	-5
50	1850	-5.5
40	1780	-6.5
30	1700	-7.9
20	1610	-10.2

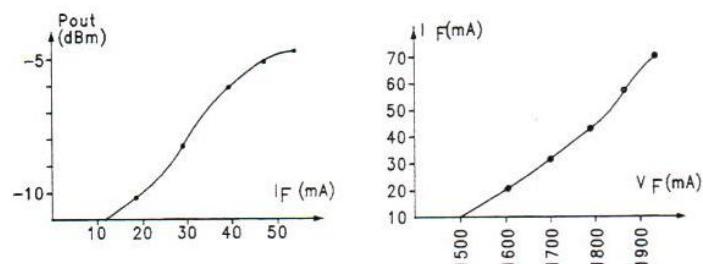


Figura 964.11 – Curvas características de um LED..

964.7 – Questões

Q2 – De que maneira a potência óptica emitida pelos LED e Diodo Laser variam?

Grupo

A B

- 1 4 Ela decresce quando a corrente direta aumenta.
- 2 3 Ela decresce quando a corrente reversa aumenta.
- 3 2 Ela decresce quando a corrente direta aumenta (para o diodo Laser); ela aumenta quando a corrente direta aumenta (para um LED).
- 4 1 Ela aumenta quando a corrente direta aumenta.

Q3 – Qual das seguintes alternativas descreve as características típicas de um LED?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 2 | Potência óptica de saída: dezenas de mW;
Comprimento de onda 660 – 850 – 1330 – 1550 nm;
Largura espectral: dezenas de nm;
Montagem: apenas pigtail – rabicho;
Custo: elevado;
Aplicação: links acima de vários Gb/s, para distâncias igual a centenas de km. |
| 2 | 3 | Potência óptica de saída: centenas de W;
Comprimento de onda 1330 – 1550 nm;
Largura espectral: poucos nm;
Montagem: tipicamente pigtail – rabicho;
Custo: elevado;
Aplicação: links acima de vários Gb/s, para distâncias igual a centenas de km. |
| 3 | 1 | Potência óptica de saída: dezenas de mW;
Comprimento de onda 660 – 850 – 1330 – 1550 nm;
Largura espectral: dezenas de nm;
Montagem: receptáculo ou pigtail – rabicho;
Custo: médio;
Aplicação: links em centenas de Mb/s, para distâncias igual a dezenas de km. |

- 4 5 Potência óptica de saída: centenas de mW;
Comprimento de onda 660 – 850 – 1330 – 1550 nm;
Largura espectral: poucos nm;
Montagem: apenas receptáculo;
Custo: médio;
Aplicação: links em centenas de Mb/s, para distâncias igual a dezenas de km.
- 5 4 Potência óptica de saída: centenas de mW;
Comprimento de onda 1330 – 1550 nm;
Largura espectral: poucos nm;
Montagem: tipicamente pigtail – rabicho;
Custo: elevado;
Aplicação: links acima de vários Gb/s, para distâncias igual a centenas de km.

Q4 – Qual das alternativas anteriores descreve as características típicas de um Diodo Lazer?

Lição 965: Fotodetectores

Objetivos:

- Descrever as características operacionais e os parâmetros dos Fotodiodos e dos Fotodiodos de Avalanche utilizados como fotodetectores nos sistemas de transmissão com fibras ópticas.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;
- Osciloscópio.

965.1 – Introdução

Os fotodetectores podem transformar um sinal óptico incidente em sinais elétricos. Os requisitos principais de um fotodetector são:

- Alta sensibilidade, que corresponde à capacidade de absorver a máxima quantidade da radiação incidente;
- Alta taxa de resposta, de forma a detectar os pulsos de luz muito estreito;
- Dimensões limitadas, baixo custo, confiabilidade e fidedignidade.

Os fotodetectores mais comuns utilizados nos sistemas de fibras ópticas são os fotodiodos PN e PIN e os fotodiodos de avalanche (APD).

965.2 – Fotodiodos PN e PIN

O princípio de operação dos fotodiodos está baseado em uma propriedade particular dos semicondutores: isto é, um fóton absorvido por um semicondutor gera um par de elétron-lacuna. Aplicando uma polarização reversa a uma junção PN gera-se uma corrente reversa proporcional à radiação luminosa incidente (FIG. 965.1a). A performance de um fotodiodo (especialmente sua taxa de resposta) pode melhorar se uma camada levemente dopada, denominada I (de intrínseca) é colocada entre as camadas P e N. Esses diodos são denominados fotodiodos PIN (FIG. 965.1b)

Eficiência quântica

O elétron pode ser liberado apenas se o fóton tem uma quantidade de energia acima da energia de gap do semicondutor utilizado. Como a energia de um fóton depende do comprimento de onda da radiação, o efeito máximo da fotodetecção em diferentes comprimentos de ondas será obtido segundo o semicondutor utilizado. A eficiência quântica é definida como a relação entre o “número de elétrons emitidos por unidade de tempo” e o “número de fótons incidentes por unidade de tempo”. A FIG. 965.2 apresenta o esboço da eficiência quântica para três materiais diferentes (Silício, Germânio e Gálio-índio-arsênio) em função do comprimento de onda.

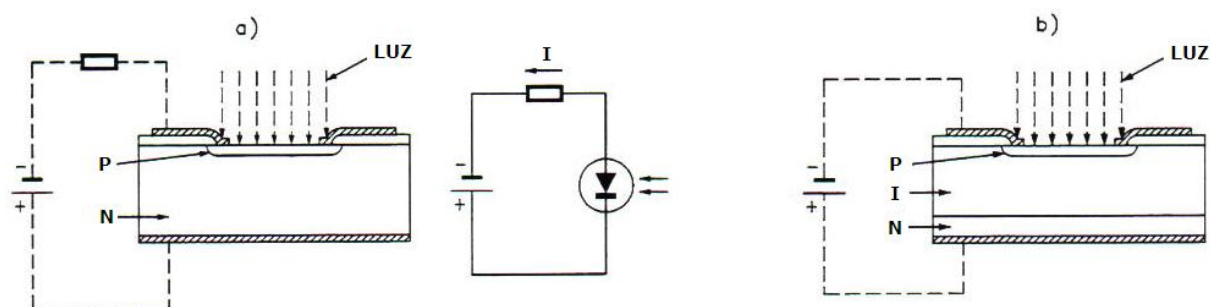


Figura 965.1 – a) estrutura de um fotodiodo PN;

b) estrutura de um fotodiodo PIN.

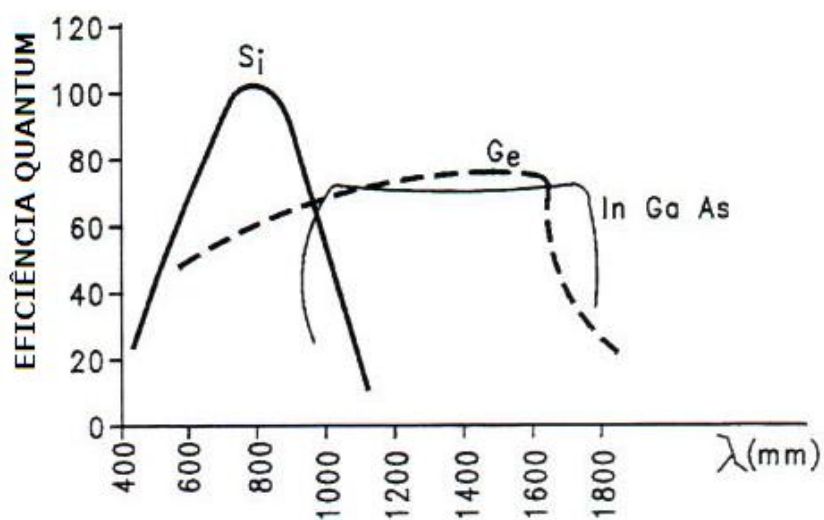


Figura 964.2 – Eficiência quântica.

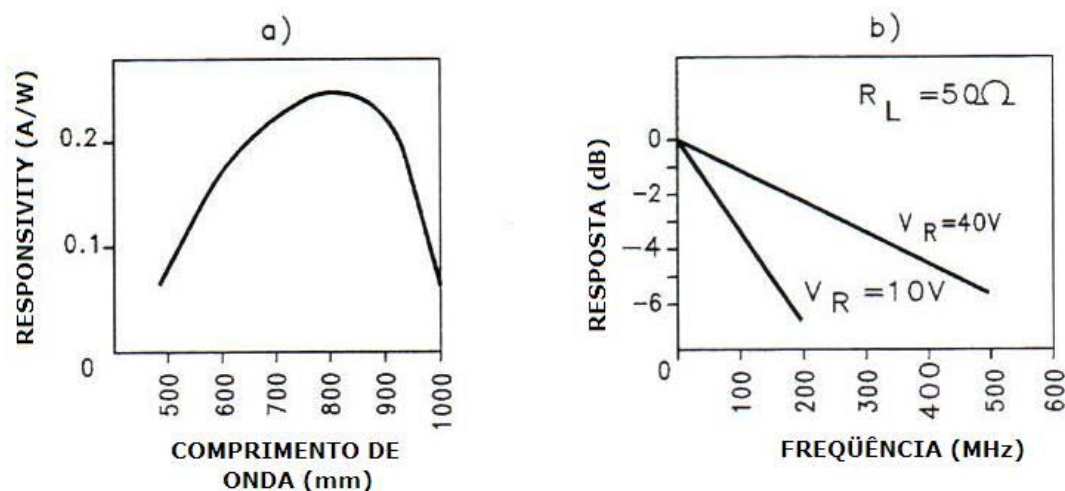


Figura 964.3 – a) *Responsivity*;

b) Resposta de frequência.

Responsivity

Um parâmetro de uso mais prático é a *responsivity*, que relaciona a quantidade de potência óptica incidente no dispositivo e a corrente elétrica gerada. A FIG. 965.3a mostra um esboço típico da *responsivity* de um fotodiodo de silício.

Resposta de frequência (tempo de resposta)

Esse parâmetro define a capacidade de um fotodiodo em detectar sinais ópticos em altas frequências. A FIG. 965.3b apresenta uma curva de resposta típica.

965.3 – Fotodiodo de Avalanche

Os fotodiodos de avalanches (APD) convertem os sinais ópticos em sinais elétricos. O APD é reversamente polarizado na zona de ruptura – *Breakdown*

zone, também denominada zona ou região de avalanche (FIG. 965.4). Graças ao efeito de avalanche, os elétrons gerados por um débil sinal luminoso geram outros elétrons tanto que um sinal luminoso fraco gera uma corrente reversa alta. Por essa razão o APD gera uma corrente reversa proporcional à luz incidente (FIG. 965.5), mas sua corrente é muito maior do que aquela obtida a partir de um fotodiodo normal.

A matéria prima mais comuns na construção dos APD são o silício (Si) para comprimentos de onda entre 600 a 900 nm, germânio (Ge) para comprimento de onda entre 1200 e 1500 nm, Índio Gálio Arsênico (InGaAs) para comprimentos de onda maiores. A tensão de ruptura atinge algumas centenas de volts, para os APD de Si, algumas dezenas de volts, para os APD de Ge e uma centena de volts, para os APD de InGaAs.

Considere apenas o 3º quadrante da curva apresentada na FIG 965.4 onde registra-se os valores da tensão reversa V_R no eixo X e a foto-corrente I_P (isto é, a corrente reversa) no eixo Y, assim, é possível traçar as curvas representando o APD em sua região de operação normal. A FIG. 965.6 apresenta essas curvas relacionando a variação da luz incidente em APD de silício com uma tensão de ruptura, aproximadamente, de 130 V.

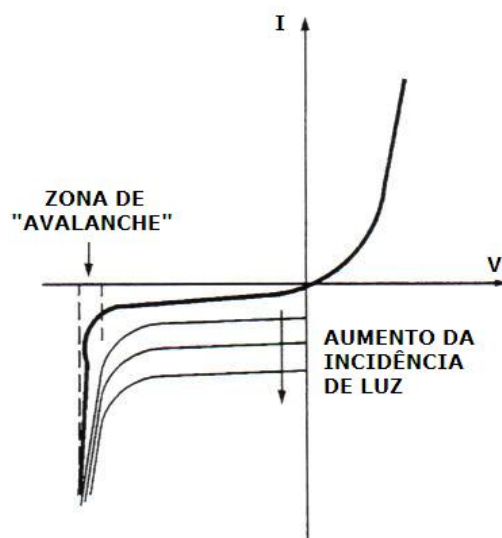


Figura 965.4 – Curvas características de um fotodiodo de Avalanche.

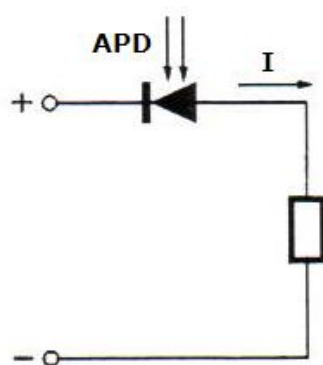


Figura 965.5 – Corrente reversa proporcional a luz incidente.

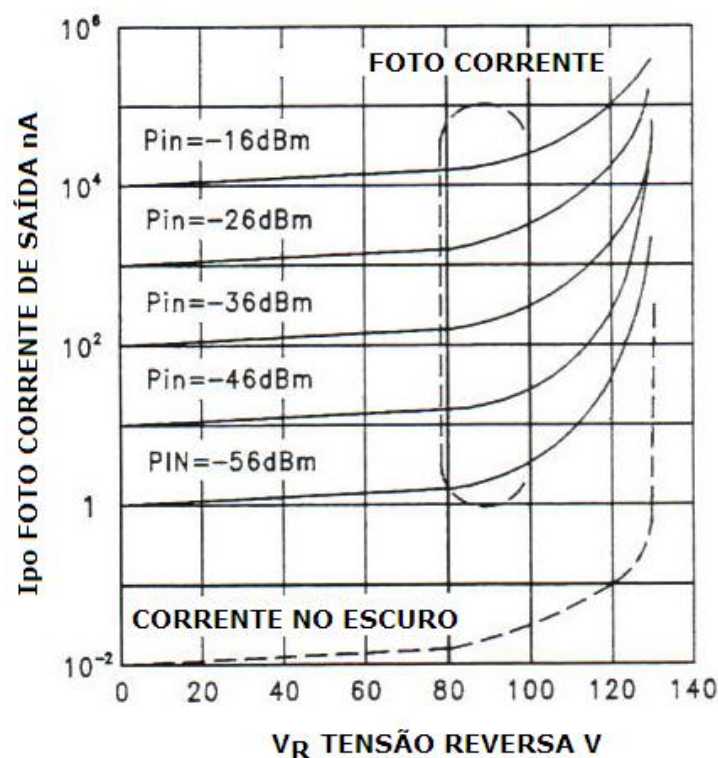


Figura 965.6 – Curvas características na região de ruptura.

Principais parâmetros

Os parâmetros mais importantes definindo as características operacionais de uma APD são:

- *Corrente no escuro* – *Dark current* - I_D : é a corrente reversa através do APD sem incidência de luz. Ela depende da corrente reversa de polarização;
- *Foto-corrente* – *photo-current* - I_p : é a corrente reversa gerada pela incidência de luz. Ela depende da tensão de polarização reversa e do comprimento de onda da radiação;
- *Fator multiplicativo M*: esse é um parâmetro importante dos APD. Observando a FIG. 965.7, ele é definido como a relação entre a foto-corrente (b) na região

de avalanche e a foto-corrente (a) disponível na região de operação do dispositivo como fotodiodo. Os fabricantes normalmente fornecem as curvas correspondentes a M e a corrente no escuro em função da tensão de polarização reversa. (FIG. 965.8);

- *Sensibilidade (ou responsivity) S*: ela determina o quanto de corrente é fornecido por um dispositivo quando incide sobre o mesmo uma potência óptica unitária:

$$S = \frac{\text{Fotocorrente de saída}}{\text{Potência óptica incidente}} = \frac{I_p}{P} \quad [A/W]$$

A sensibilidade é definida para um baixo valor de tensão de polarização, quando o APD opera como um fotodiodo normal. Geralmente os fabricantes também fornecem a curva de responsivity em função do comprimento de onda da radiação incidente (FIG. 965.9a).

- *Resposta de frequência (ou tempo de resposta)*: como no caso dos fotodiodos normal, ele define a capacidade do dispositivo em detectar sinais ópticos em altas frequências. A FIG. 965.9b apresenta uma curva de resposta típica.

De acordo com as definições apresentadas, a fotocorrente I_p gerada por um APD é determinada pela seguinte expressão:

$$I_p = S.M.P \quad [A]$$

Se o APD está polarizado na região de avalanche, M é muito alto e, conseqüentemente, a fotocorrente I_p também será muito maior do que aquela gerada por um fotodiodo.

As principais diferenças caracterizando um fotodiodo de avalanche em relação a um fotodiodo normal são:

- Maior *responsivity*, mas dependente da temperatura;

- Frequentemente, maior faixa passante;
- Necessidade de uma tensão de polarização elevada;
- Maior custo;
- Soluções com circuitos mais complexos: particularmente os circuitos de polarização e o de controle de temperatura devem ser utilizados para evitar variações na *responsivity*.

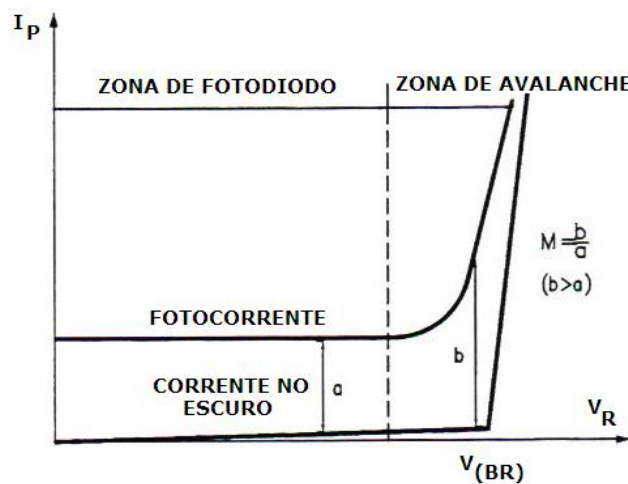


Figura 965.7 – Parâmetros dos APDs.

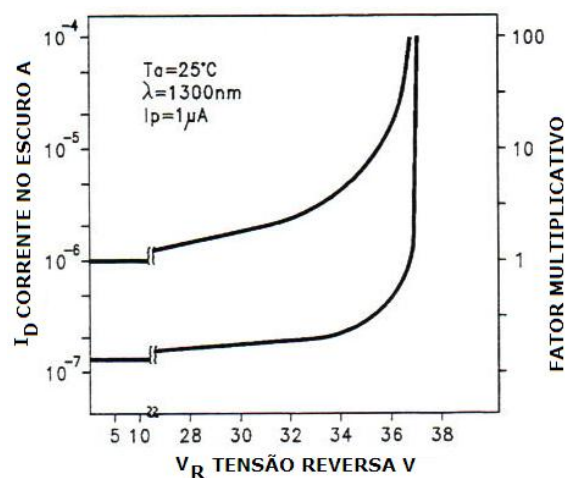


Figura 965.8 – Corrente no escuro e fator M.

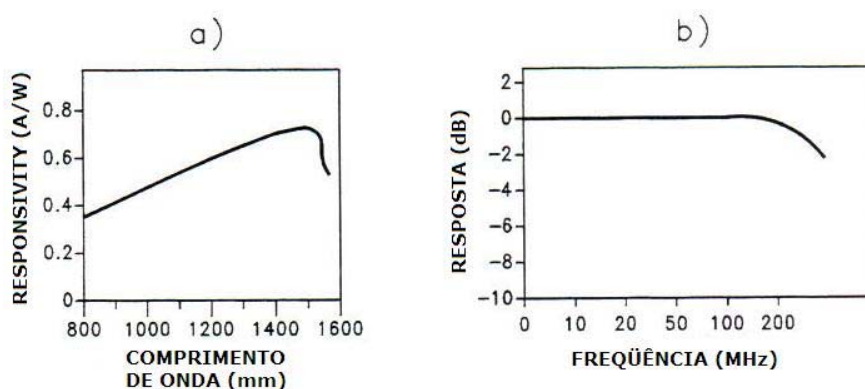


Figura 965.9 – a) Responsivity; b) Resposta de frequência.

965.4 – Acoplamento da fibra óptica ao detector

A quantidade máxima da radiação luminosa vinda através de uma fibra deve atingir a superfície sensível do detector. Os fabricantes fornecem fotodiodos e fotodiodos de avalanche (bem como outras fontes ópticas, apresentadas nas lições anteriores) já montadas de forma adequada para serem acopladas às fibras. Existem dois tipos de montagem:

- Com receptáculos (FIG. 965.10a): os fabricantes geralmente indicam a área da superfície sensível e/ou a Abertura Numérica do dispositivo;
- Com *pigtail* (FIG. 965.10b): os fabricantes geralmente indicam o tipo de fibra empregado na construção do *pigtail* e sua Abertura Numérica.

No primeiro caso, a fibra será acoplada à fonte através de conectores (o conector fêmea instalado na fonte e um conector macho na extremidade da fibra). No outro caso, quando um link for construído, a fibra será soldada diretamente na extremidade do *pigtail* do detector.

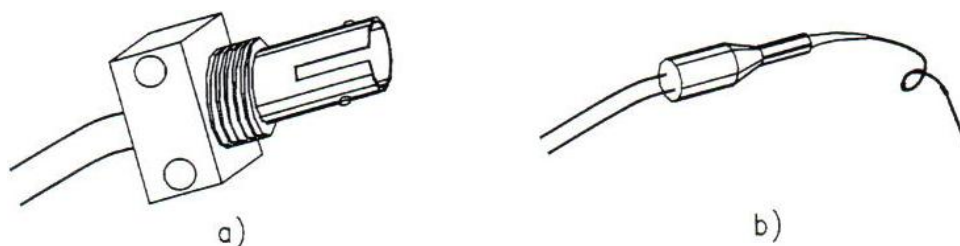


Figura 964.10 – a) detector construído com receptáculo b) detector com pigtail.

965.5 – Amplificação do sinal detectado

O sinal emitido pelo fotodetector pode ser amplificado por meio de dois tipos de circuitos:

- Um pré-amplificador de alta impedância (FIG. 965.11a);
- Um pré-amplificador de trans-impedância (FIG. 965 11b).

No primeiro caso, a corrente (proporcional ao sinal luminoso) gerada pelo fotodetector passa por um resistor na qual uma tensão é desenvolvida, então esse sinal é amplificado.

No pré-amplificador de trans-impedância, a corrente é diretamente transformada em uma tensão, pelo efeito de realimentação devido a resistência.

Assim, $V_{OUT} = I_R \cdot R$.

Com relação à sensibilidade e ao ruído, os pré-amplificadores de alta impedância oferecem pior desempenho, enquanto que os pré-amplificadores de trans-impedância apresentam uma faixa passante maior.

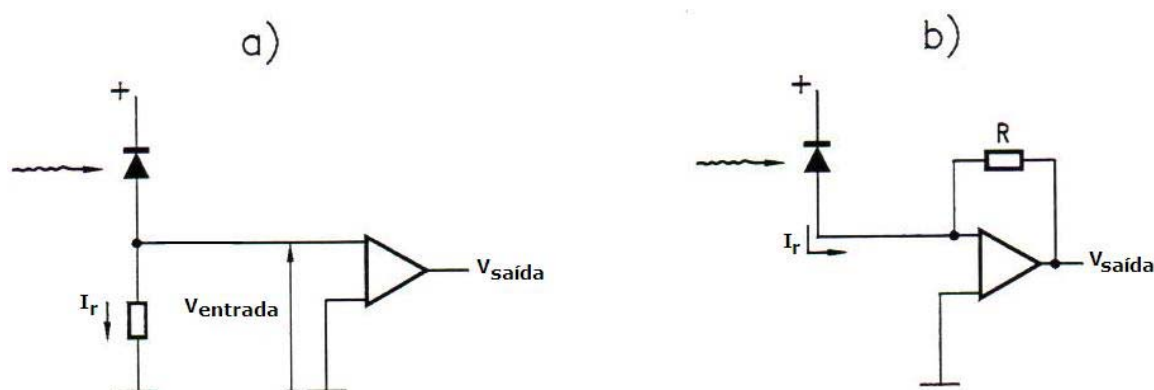


Figura 965.11 – Pré-amplificadores de: a) alta impedância b) trans-impedância.

965.6 – Tabela sumária sobre os fotodetectores

A tabela a seguir resume alguns dados típicos a respeito dos fotodiodos e dos fotodiodos de avalanche.

	Fotodiodo	Fotodiodo de Avalanche
Sensibilidade	0.1 – 1 A/W	10 – 100 vezes maior do que a de um fotodiodo
Comprimento de onda	660 nm e 1ª / 2ª / 3ª janelas (típico)	2ª / 3ª janelas (típico)
Complexidade dos circuitos	Médio / baixo	Alto
Resposta de frequência	Centenas de MHz	Dezenas de GHz
Montagem	Receptáculo <i>Pigtail</i> (2ª / 3ª janelas)	<i>Pigtail</i>
Custo	Médio (<500 dólares)	Alto (<1000 dólares)
Aplicação	Telemetria. Transmissões analógicas e digitais com uma taxa média (10 Mb/s) em distâncias curtas (< 2km) utilizando fibra plástica. Comprimento de onda de 660 nm. Redes locais analógicas ou de dados com transmissões a uma taxa média (10 Mb/s) em distâncias médias (< 10 km) utilizando fibras de vidro. Comprimento de onda na 1ª janela. Vídeo, redes locais de dados com transmissões a uma taxa alta (200 Mb/s) em distâncias médias (< 50 km) utilizando fibra de vidro. Comprimento de onda na 1ª / 2ª / 3ª janelas.	Vídeo, redes locais de dados com transmissões a uma taxa alta (200 Mb/s) em distâncias médias / longas (100 km) utilizando fibra mono modo. Comprimento de onda na 2ª e 3ª janelas. Transmissões digitais com taxas muito alta (Gb/s) em longas distâncias (< 400 km) utilizando fibra mono modo. Comprimento de onda na 2ª e 3ª janelas.

965.7 – Exercícios

UTF1 – Desconecte todos os *jumpers*.

FIP – Entre com o código da lição: 965.

965.7.1 – *Responsivity* do detector

Fotodiodo PD1

- Alimente o Cartão de prática;
- Desconecte os *jumpers* J11 – J12 e conecte o *jumper* J13b, de forma a construir o circuito da FIG. 965.12. Esta configuração inclui o LED a 820 nm, polarizado diretamente por meio do *trimmer* BIAS (P4). Gire P4 completamente para a direita (máxima tensão de polarização);
- Conecte o LED 1 e o fotodiodo PD1 (820 nm) por meio do **cabo #3** (fibra 200/230);
- Conecte um voltímetro (ou o osciloscópio na função DC) no TP23, onde a tensão fornecida pelo detector será medida. Considere que a tensão medida é proporcional à corrente gerada pelo fotodiodo;
- Agora, troque a fibra do LED 1 (820 nm) para o LED 2 (660 nm). Remova o *jumper* J13b e conecte o *jumper* J12b;
- Meça a nova tensão na saída do detector (TP23).

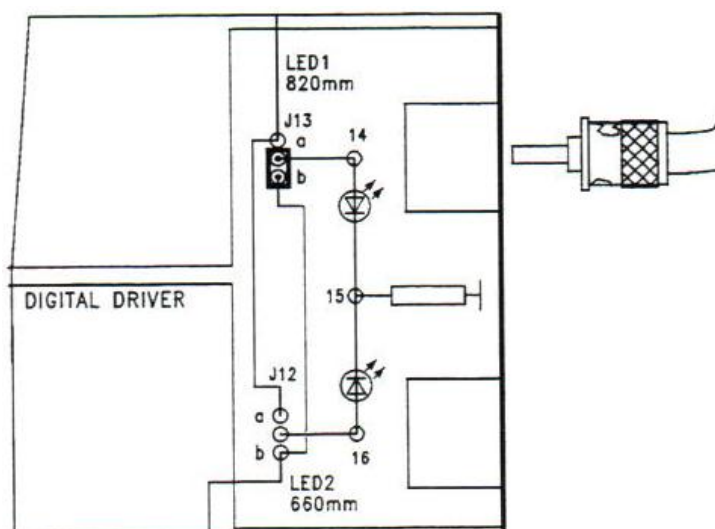


Figura 965.12 – Montagem no Cartão de Prática.

Q1 – Qual das seguintes afirmativas está correta?

Grupo

A B

- 1 2 A tensão é igual a aquela detectada no caso anterior (fonte de 820 nm, detector de 820 nm).
- 2 1 A tensão é menor, porque a atenuação na fibra é maior em 660 nm do que em 820 nm.
- 3 4 A tensão é menor, porque o fotodiodo PD1 alcança sua maior sensibilidade em 820 nm.
- 4 3 A tensão é maior do que aquela detectada no caso anterior (fonte de 820 nm, detector de 820 nm), porque o LED 2 emite uma potência maior do que a do LED 1.

Fotodiodo PD2

- Desconecte os *jumpers* J11 – J13 e conecte o *jumper* J12b de forma a construir a o circuito como apresentado na FIG. 965.13;
- Conecte o LED 2 ao fotodiodo de 660 nm (PD2) utilizando o cabo #2 (fibra plástica), o adaptador ST – ST e o conector HP – ST;
- Conecte um voltímetro (ou o osciloscópio na função DC) ao ponto TP24, onde a tensão gerada pelo detector será medida. Considere que a tensão medida é proporcional à corrente fornecida pelo fotodiodo;
- Agora, troque a fibra do LED 2 (660 nm) para o LED 1 (820 nm). Remova o *jumper* J12b e conecte o *jumper* J13b;
- Meça a nova tensão na saída do detector (TP24).

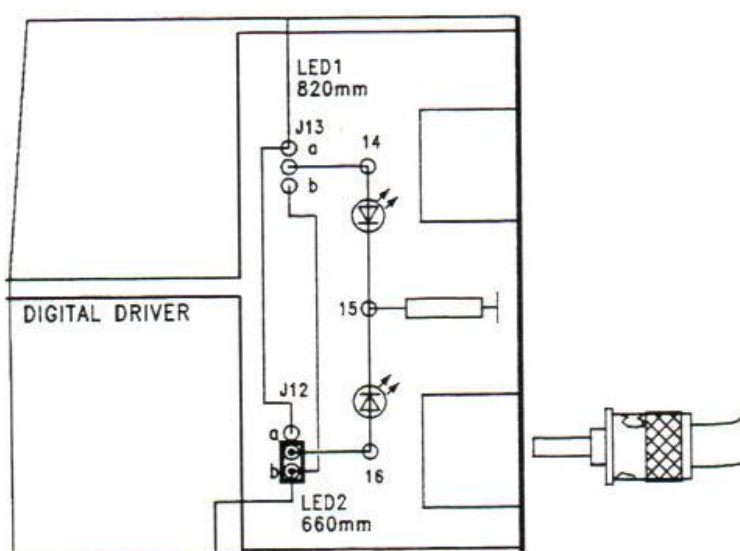


Figura 965.13 – Montagem no Cartão de Prática.

Q2 – Qual das seguintes afirmativas está correta?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | A tensão é menor (realmente ele coincide com a tensão medida sem o sinal óptico), porque o fotodiodo PD2 atinge sua sensibilidade máxima a 660 nm e a atenuação na fibra é maior a 820 nm do que em 660 nm. |
| 2 | 3 | A tensão é maior do que aquela detectada no caso anterior (fonte de 660 nm, detector de 660 nm), porque o LED 1 emite uma potência maior do que o LED 2. |
| 3 | 2 | A tensão é igual àquela detectada no caso anterior (fonte de 660 nm, detector de 660 nm). |
| 4 | 1 | A tensão é menor (realmente ela coincide com a tensão medida sem o sinal óptico), porque a atenuação da fibra é maior a 660 nm do que em 820 nm. |

Q3 – O que se pode inferir a partir das considerações anteriores?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 5 | Os fotodiodos tem um curva de resposta que não depende do comprimento de onda da luz incidente. |
| 2 | 1 | A sensibilidade de ambos os fotodiodos atinge seu pico máximo em 660 nm. |
| 3 | 4 | O fotodiodo PD1 atinge sua máxima sensibilidade em 660 nm, PD2 em 820 nm. |
| 4 | 2 | A sensibilidade de ambos os fotodiodos atinge seu pico máximo em 820 nm. |
| 5 | 3 | O fotodiodo PD2 atinge sua máxima sensibilidade em 660 nm, PD1 em 820 nm. |

965.8 – Questões

Q4 – Como o fotodiodo é polarizado? Qual de seus parâmetros é proporcional a luz incidente?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | Com uma tensão positiva entre o catodo e o anodo. Polarização direta. |
| 2 | 3 | Com uma tensão negativa entre o anodo e o catodo. Polarização reversa. |
| 3 | 2 | Com uma tensão alternada entre o catodo e o anodo. Polarização reversa. |
| 4 | 1 | Com tensão negativa entre o catodo e o anodo. Para obter uma capacitância de junção |

Q5 – Como o sinal gerado pelo fotodiodo será amplificada?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | Com amplificadores de alta impedância na entrada ou amplificadores de trans-impedância. |
| 2 | 3 | Com amplificadores de baixa impedância de entrada ou amplificadores de trans-condutância. |
| 3 | 2 | A amplificação não é necessária. |
| 4 | 1 | Com amplificadores seletivos de ganho variável. |

Q6 – O fotodiodo de avalanche:

Grupo

A B

- 1 2 É polarizado com uma alta tensão reversa; havendo igual incidência de luz, ele gera uma corrente direta que pode ser 100 vezes maior do que a de um fotodiodo PIN, apenas é polarizado na região de ruptura (*Breakdown*); é normalmente empregado na 1ª e 2ª janelas, em *links* a curta distância; apresenta o mesmo custo de um fotodiodo PIN.
- 2 3 É polarizado com uma alta tensão direta; havendo igual incidência de luz, ele gera uma corrente reversa que pode ser 100 vezes maior do que a de um fotodiodo PIN, igualmente, é polarizado com baixas tensões; é normalmente empregado na 2ª e 3ª janelas, em *links* a longa distância; apresenta um custo maior do que a de um fotodiodo PIN.
- 3 1 É polarizado com uma alta tensão reversa; havendo igual incidência de luz, ele gera uma corrente direta que pode ser 100 vezes maior do que a de um fotodiodo PIN, apenas é polarizado na região de ruptura (*Breakdown*); é normalmente empregado na 2ª e 3ª janelas, em *links* a longa distância; apresenta um custo maior do que a de um fotodiodo PIN.

Q7 – Qual das seguintes alternativas descreve as características típicas de um fotodiodo PIN?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 4 | Sensibilidade: 10 – 100 A/W; Comprimento de onda: 660 – 850 – 1330 – 1550 nm; Resposta de frequência: centenas de MHz; Montagem: apenas pigtail; Custo: elevado; Aplicações: links acima de vários Gb/s, sobre centenas de km. |
| 2 | 5 | Sensibilidade: 0,1 – 1 A/W; Comprimento de onda: 660 – 850 – 1330 – 1550 nm; Resposta de frequência: centenas de MHz; Montagem: apenas receptáculo e pigtail; Custo: médio / baixo; Aplicações: links acima de vários Mb/s, sobre dezenas de km. |
| 3 | 1 | Sensibilidade: 10 – 100 A/W; Comprimento de onda: 1330 – 1550 nm; Resposta de frequência: dezenas de GHz; Montagem: apenas receptáculo; Custo: elevado; Aplicações: links acima de vários Gb/s, sobre centenas de km. |
| 4 | 2 | Sensibilidade: 10 – 100 A/W; Comprimento de onda: 1330 – 1550 nm; Resposta de frequência: dezenas de GHz; Montagem: pigtail; Custo: elevado; Aplicações: links acima de vários Gb/s, sobre centenas de km. |
| 5 | 3 | Sensibilidade: 10 – 100 mA/W; Comprimento de onda: 1330 – 1550 nm; Resposta de frequência: dezenas de GHz; Montagem: apenas receptáculo; Custo: baixo; Aplicações: links acima de vários Gb/s, sobre centenas de km. |

Q8 – Qual das alternativas anteriores descreve as características típicas de um fotodiodo de avalanche?

Lição 966: Introdução aos Sistemas de Comunicações

Objetivos:

- Descrever o princípio dos sistemas de comunicações utilizando fibra óptica;
- Descrever o dimensionamento de um link óptico.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;

966.1 – Introdução

Transmissores e receptores ópticos podem ser empregados para transmitir (e receber) sinais digitais ou analógicos (FIG. 966.1). No primeiro caso, a fonte emite dois níveis de potência óptica correspondentes aos níveis “alto” ou “baixo” do sinal digital. No outro caso, a fonte emite uma potência óptica que varia continuamente, segundo o sinal analógico aplicado. A utilização da transmissão digital ou analógica dependerá do formato da informação que será enviada. Se a informação é do tipo digital, um transmissor digital será empregado; caso contrário, se a informação é do tipo analógico, um transmissor analógico será empregado, também sendo possível empregar um transmissor digital, mas o sinal a ser enviado deve sofrer uma conversão analógico-digital.

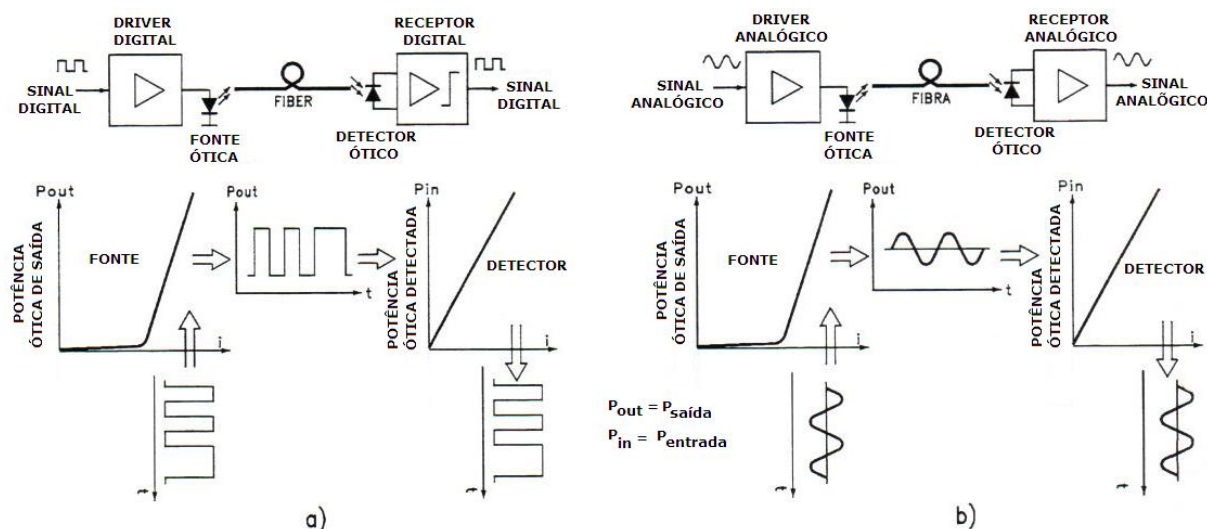


Figura 966.1 – Sistema de comunicação a) digital e b) analógico.

966.2 – Sistemas de Comunicação Digital

A estrutura geral de um sistema de comunicação digital é mostrada na FIG 966.2.

Normalmente, antes de ser aplicado ao transmissor óptico real, os dados digitais passam por um processamento ou codificação. Existem vários tipos de códigos (Manchester, Bi-fase, 3B4B, 6B8B, 9B10B, etc. códigos de blocos), mas todos eles executam dupla função:

- Remover o *offset* da corrente direta do sinal digital original que normalmente tem um formato NRZ (*Non-Return-to-Zero* – Não Retorna a Zero);
- Aplicar alternâncias na forma de onda do sinal a ser enviado, de modo a melhorar a regeneração do sincronismo (*clock*) na recepção, necessário para o correto reconhecimento do bit enviado.

As principais aplicações dos sistemas de comunicações digitais incluem (FIG. 966.3):

- Transmissão de dados com *links* diretos;
- Transmissão de dados com TDM (*Time Division Multiplexing* – Multiplexação por divisão de tempo);
- *Links* telefônicos com PCM (*Pulse Coding Modulation* – Modulação por Codificação de Pulso);
- *Link* de vídeo digital;
- *Link* de redes locais;
- Sistemas de controle e supervisão;
- Telemetria.

Na telemetria é necessário transmitir sinais analógicos adquiridos a partir de medições; esses sinais normalmente apresentam uma frequência muito baixa e um *offset* na corrente direta. Um método comumente empregado consiste em converter este sinal em variações de frequência de uma forma de onda quadrada ou, em outras palavras, utilizar uma modulação em frequência em uma portadora com forma de onda quadrada.



Figura 966.2 – Estrutura de um sistema de comunicação digital,

utilizando fibra óptica.

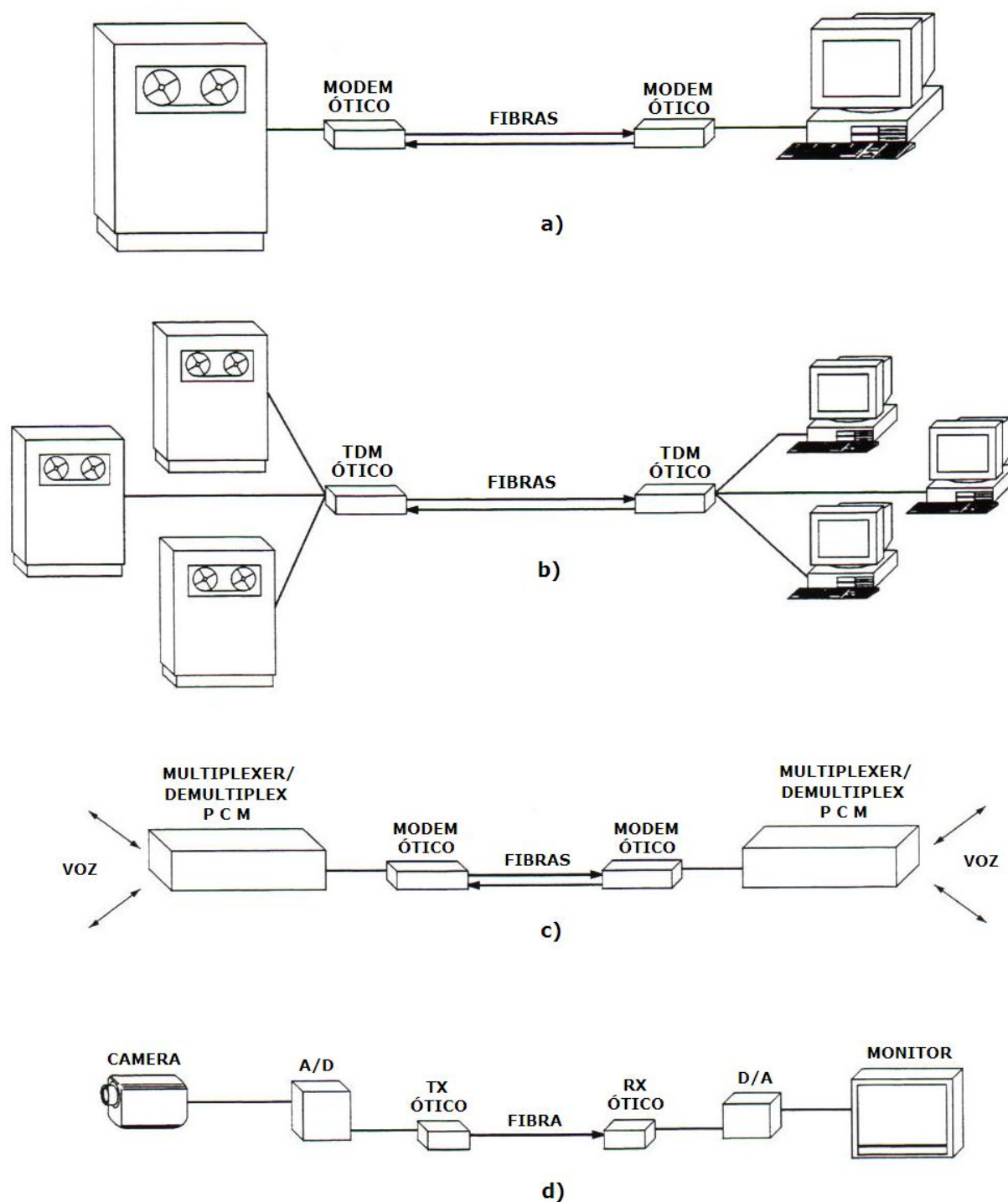


Figura 966.3 – a) Transmissão de dados utilizando link direto;

b) Transmissão de dados utilizando Multiplex TDM;

c) Link telefônico utilizando PCM;

d) *Link* de vídeo digital.

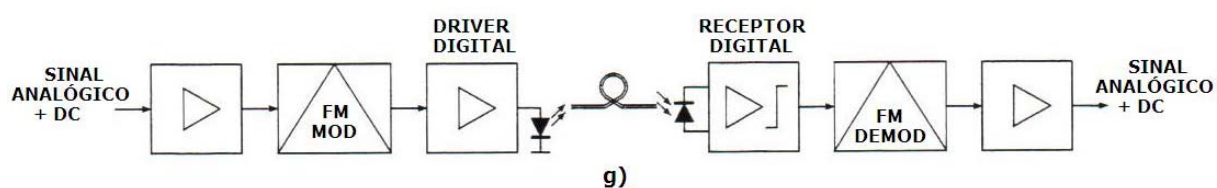
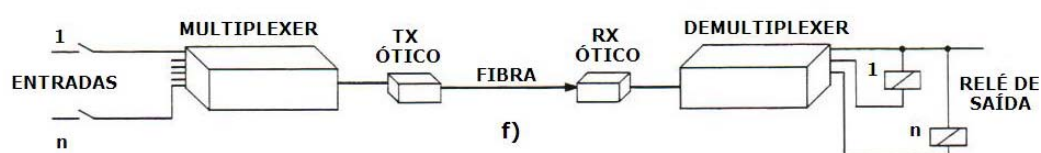
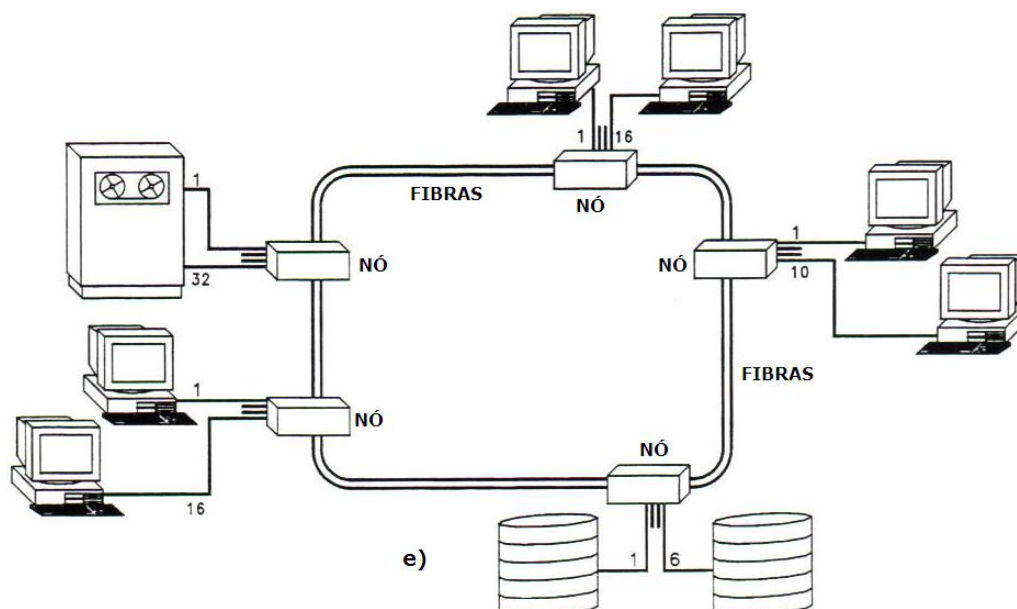


Figura 966.3 – e) *Link* de uma rede local;

f) Sistema de controle e supervisão;

g) Telemetria.

966.3 – Sistemas de Comunicação Analógica

Os sistemas de comunicação analógica são empregados, principalmente, para a transmissão de sinais de vídeo, em aplicações de sistemas de telecontrole, vídeo conferência, transmissão de programas de TV, etc.

Se apenas um canal de vídeo é transmitido, o sinal modula diretamente o *Driver* Analógico (FIG. 966.4a).

Também existem aplicações onde mais canais de vídeo (com seus respectivos sistemas de áudio) são transmitidos ao mesmo tempo utilizando uma fibra óptica única (FIG. 966.4b). Neste caso, os canais são multiplexados utilizando-se a técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Frequência), antes de ser aplicado ao *Driver* Analógico. Na recepção, os sinais são separados por meio de filtros e demoduladores.

Os circuitos no cartão de prática UTF1 podem ser combinados um canal de vídeo e um canal de áudio e, então, ambos os canais serão transmitidos sobre uma única fibra.

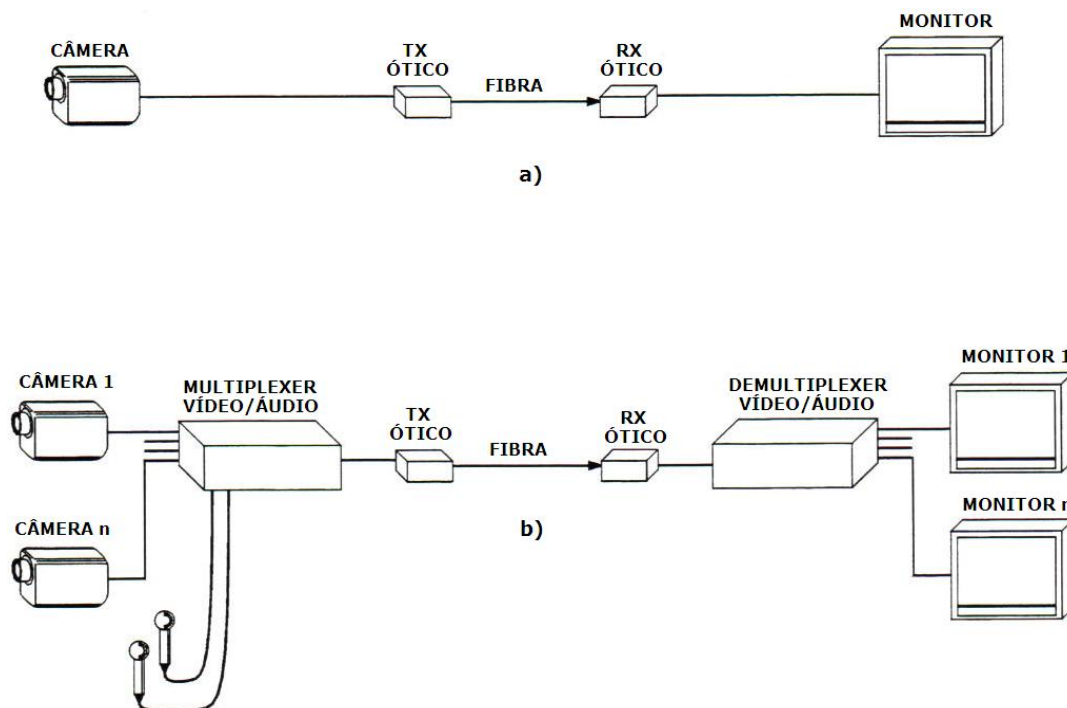


Figura 966.4 – a) Transmissão de vídeo em um único canal;
b) Transmissão de vídeo multicanais.

966.4 – Dimensionamento de um link

966.4.1 – Potência Mínima

O projeto de um link de fibra óptica inclui os cálculos do que se denomina *power margin* – potência mínima.

Considere a FIG. 966.5, onde um diagrama típico de um link de fibra óptica é apresentado. As potências ópticas disponíveis nos vários pontos do link estão relacionadas por meio da seguinte expressão:

$$P_T - x.\alpha - P_L = P_R$$

onde:

- P_T é a potência vindo da fonte e entrando na fibra. Os fabricantes normalmente especificam o tipo de fibra (diâmetro do núcleo e Abertura Numérica) a que se refere esta potência. Se for utilizada uma fibra óptica diferente daquela descrita no manual, a potência efetiva que penetra na fibra dependerá da diferença do diâmetro (obviamente, apenas se o diâmetro na recepção for menor do que aquele utilizado na transmissão) ou da Abertura Numérica (nesse caso apenas se a Abertura Numérica no lado da recepção for maior do que aquela utilizada na transmissão). A diferença de potência ΔP_D devido a diferença nos diâmetros é expressa por:

$$\Delta P_D \approx 20.\log(D_1 / D_2) \text{ dB}$$

A diferença de potência ΔP_{NA} devido à diferença na Abertura Numérica é expressa por:

$$\Delta P_{NA} \approx 20.\log(D_{NA1} / D_{NA2}) \text{ dB}$$

Considere o exemplo de uma fonte que emite uma potência de -12,5 dBm que penetra num fibra de 62,5 μm e tem uma Abertura Numérica, $NA = 0,29$. Se a fibra empregada é de 50 μm com um $NA = 0,23$, então a potência emitida que penetra a fibra será:

$$P_T = -12,5 + 20\log(50/62,5) + 20\log(0,23/0,29) \approx -16,4 \text{ dBm}$$

- α é a atenuação da fibra óptica por quilômetro (dB/km)
- X = comprimento da fibra
- P_L são as perdas devido aos componentes do *link*, tais como conectores, uniões, etc.

- P_R é a potência óptica fornecida ao receptor.

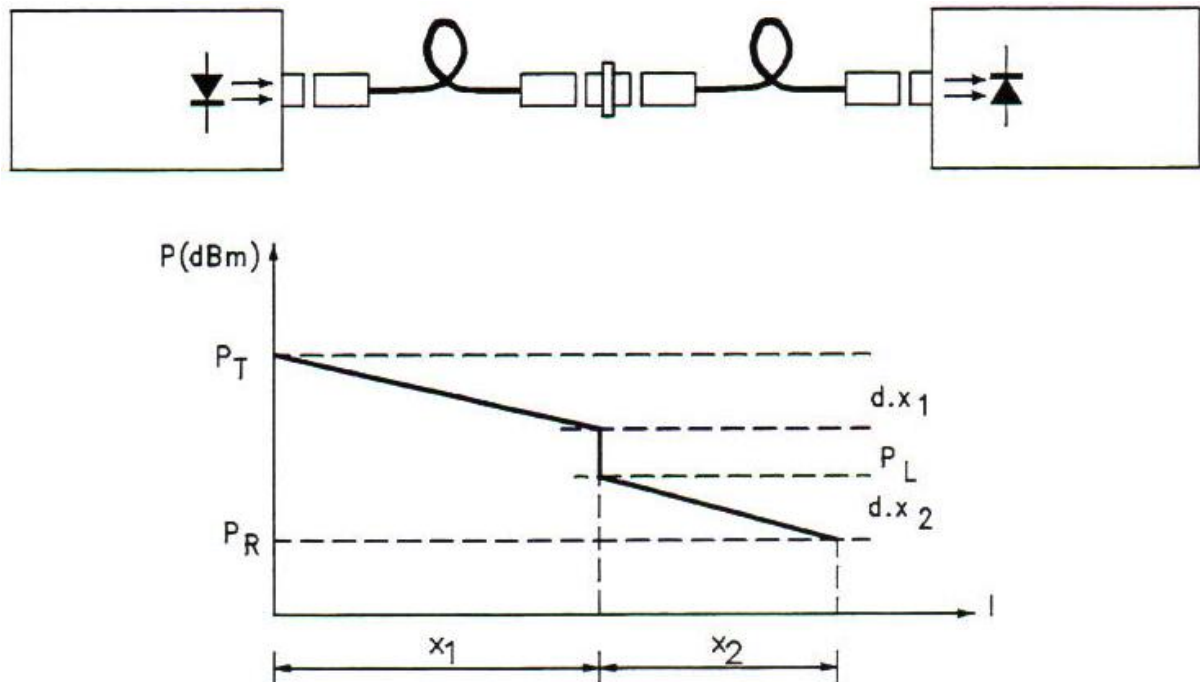


Figura 966.5 – Balanço de potência num link óptico.

Considere a sensibilidade de um receptor, que é a mínima potência óptica, P_{Rm} , exigida para o funcionamento do link dentro de um padrão de qualidade (nos sistemas digitais isso é normalmente expresso pela máxima taxa de erro permitida, tipicamente 10^{-9}): a partir da expressão inicial é possível obter a potência mínima – *power margin* P_M :

$$P_M = P_T - P_{Rm} = x.\alpha + P_L$$

Como apresentado nas expressões anteriores, a potência mínima – *power margin* é um valor que indica o quanto da potência óptica pode ser perdida no link, segundo um determinado parâmetro de qualidade estabelecido previamente. Consequentemente ela determina a máxima distância para o link. Por exemplo, considere um par transmissor/receptor que fornece uma potência mínima – *power margin* de 18 dB sobre uma fibra óptica de 50 µm e NA = 0,23. Se a fibra utilizada tem uma atenuação de 3 dB/km e nenhum componente intermediário foi conectado, a distância máxima admissível será de:

$$D_{max} = 18 / 3 = 6 \text{ km}$$

Certamente que as considerações explicadas até o momento concernem ao balanço de potência. Realmente, a máxima distância admissível também dependerá da taxa de transmissão, como também da dispersão modal (sendo uma função do comprimento da fibra) que podem frustrar a transmissão em altas taxas para essa distância.

Se o receptor inclui o fotodetector e também um amplificador trans-impedância, alguns fabricantes não indicam o valor da sensibilidade, mas a potência de ruído óptico equivalente disponível na entrada do receptor (*Equivalent Optical Noise Input Power* P_N). Normalmente a potência do sinal óptico útil deve ser de, aproximadamente, 11 dB maior do que a P_N , a fim de obter uma taxa de erro de 10^{-9} .

966.4.2 – Exemplo de cálculo de um link

As características dos componentes montados no cartão de prática (LED e fotodiodo de 820 nm, e a fibra óptica 50/125 – cabo #4) são:

Transmissor

- Comprimento de onda: 820 nm;

- Abertura Numérica: 0,31;
- Potência óptica P_T na fibra:
 - -16,5 dBm para a fibra 50/125 com $NA = 0,18$;
 - -3 dBm para a fibra 200/300 com $NA = 0,4$.

Receptor

- Sensibilidade máxima: a 820 nm;
- Potência de ruído óptico equivalente PN: -43 dBm;
- Abertura Numérica: 0,35;
- Potência máxima de entrada: - 7,6 dBm.

Fibra 50/125 (Cabo óptico #4)

- Fibra 50/125 nm;
- $NA = 0,22$;
- Atenuação a 820 nm: 3 dB/km.

A Abertura Numérica da fibra utilizada (veja as característica do transmissor) é menor do que a do cabo #4, mas essa diferença não afeta tanto a potência óptica P_T entrando na fibra; na realidade essa potência é:

$$P_T = -16,5 \text{ dBm}$$

A taxa de erro melhor do que 10^{-9} pode ser obtida quando a potência mínima P_{Rm} está disponível à entrada do receptor, isto é:

$$P_{Rm} \approx -43 \text{ dBm} + 11 \text{ dB} = -33 \text{ dBm}$$

Assim, a potência mínima – power margin – será:

$$P_M = P_T - P_{Rm} \approx 18 \text{ dB}$$

Considerando as perdas devido as dois conectores (ela é igual a, aproximadamente de 1,5 dB por conector), a atenuação máxima devido a fibra não pode exceder ao valor de $18 - 3 = 15 \text{ dB}$. Como a fibra selecionada tem uma atenuação de 3 dB/km, a máxima distância disponível $D_{\max}$ será:

$$D_{\max} = 15 / 3 = 5 \text{ km}$$

966.5 - Questões

FIP – Entre com o código da lição: 966.

Q1 – Quais são os principais componentes para a transmissão de um sinal TTL através de um sistema de comunicação utilizando fibra óptica?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | Um multiplexador de vídeo/áudio; um circuito alimentador digital para uma fonte óptica; uma fibra óptica, um circuito alimentador para o fotodetector; um amplificador de recepção com saída digital; um demultiplexador vídeo/áudio. |
| 2 | 3 | Um codificador de sinais para dados NRZ; um circuito alimentador digital para uma fonte óptica; uma fonte óptica, um fotodetector; um amplificador de recepção com saída digital; um decodificador de dados. |
| 3 | 5 | Um codificador de sinais para dados NRZ; um circuito alimentador digital para uma fonte óptica; uma fonte óptica, uma fibra óptica; um fotodetector; um amplificador de recepção com saída digital; um decodificador de dados. |
| 4 | 2 | Um multiplexador TDM; um circuito alimentador linear para fonte óptica; uma fonte óptica; uma fibra óptica; um fotodetector; um amplificador de recepção com saída analógica; um demultiplexador TDM. |
| 5 | 1 | Um multiplexador de vídeo/áudio; um circuito alimentador linear para fonte óptica; uma fonte óptica; uma fibra óptica, um fotodetector; um amplificador de recepção com saída analógica; um demultiplexador vídeo/áudio. |

Q2 – Quais os componentes anteriormente mencionados são necessários para transmitir um sinal de áudio + vídeo através de uma fibra óptica simples?

Q3 – O que é potência mínima – *power margin* – para um *link* de fibra óptica?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 4 | É um valor que indica quanta potência óptica pode ser perdida no <i>link</i> . Ela permite determinar a máxima distância para um <i>link</i> . |
| 2 | 1 | É um valor que indica quanta potência óptica pode entrar na fibra óptica a partir do transmissor. |
| 3 | 2 | É a sensibilidade do receptor. Ela permite determinar a máxima distância para um <i>link</i> . |
| 4 | 3 | É a máxima potência que pode ser fornecida pelo transmissor. |

Lição 967: Sistema de Comunicação Digital

Objetivos:

- Descrever a operação de um transmissor óptico digital;
- Descrever a operação de um receptor óptico digital;
- Executar medidas em um sistema de comunicação.

Equipamento Necessário:

- Unidade base para o sistema MSU (mod. EP4 fonte de energia, cartão proprietário, mod. FIP – Unidade de controle e de inserção de defeitos);
- UTF1 – Cartão de prática;
- Osciloscópio.

967.1 – Sugestões Teóricas

O sistema de comunicação digital montado no cartão de prática (FIG. 967.1) é capaz de transmitir sinais digitais TTL. O sinal TTL modula a intensidade da radiação luminosa emitida por um LED, fonte óptica, montado em um conector para realizar a conexão com a fibra óptica. Na recepção, a fibra será conectada a um fotodetector (fotodiodo PIN). A corrente de saída do fotodiodo é amplificada por meio de um pré-amplificador de trans-impedância (montado no mesmo circuito do fotodiodo) que fornece uma tensão de saída. Em seguida existe um amplificador faixa larga e uma interface que fornece a compatibilidade dos TTL.

967.1.1 – Transmissor

A FIG. 967.2 apresenta um método simples de transformação de um sinal elétrico TTL em um pulso óptico. Observe o circuito e as curvas mostradas na FIG. 967.3, representando as curvas características de um LED “Corrente / Tensão” e “Potência óptica de saída P_{out} / Corrente direta I_F ”: quando o sinal TTL está em nível alto, a corrente através do resistor R_L flui pelo LED e ele emite a potência óptica. Quando o sinal está em nível baixo, a corrente I_L é absorvida pela porta TTL, a corrente I_F é quase nula e nenhuma potência óptica é emitida.

Pré-polarização e capacitor *Speed-Up*

Nesse caso, a corrente direta do LED aumenta de zero a um valor máximo limitado pelo resistor R_L . Este sistema passando da região OFF (de desligado) para a região de saturação do LED, sugere um aumento e queda do tempo do pulso óptico gerado, requerido pela região de depleção da junção (que cria a denominada *capacitância de junção*). A redução da capacitância de junção pode ser obtida por meio de uma pré-polarização do LED, tal que ele sempre esteja na região ON (de condução). Uma tênue corrente de pré-polarização garante que a capacitância de junção não descarregue mais do que o necessário quando o LED é levado ao estado OFF (de desligado). Alimentando o LED com picos de corrente nas transições de *ON-to-OFF* e *OFF-to-ON*, obtidas com um capacitor *Speed-Up* reduz os tempos da região de depleção ainda mais.

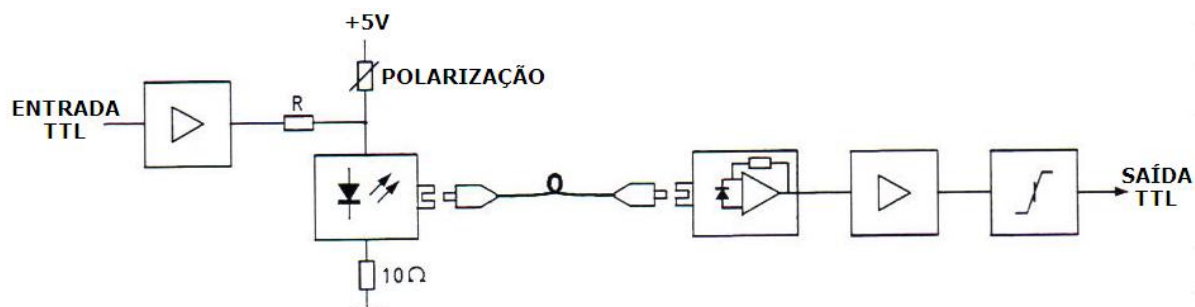


Figura 967.1 – Sistema de Comunicação Digital.

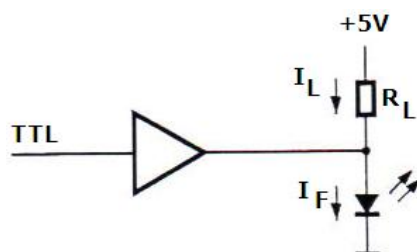


Figura 967.2 – Driving ON / OFF para um LED.

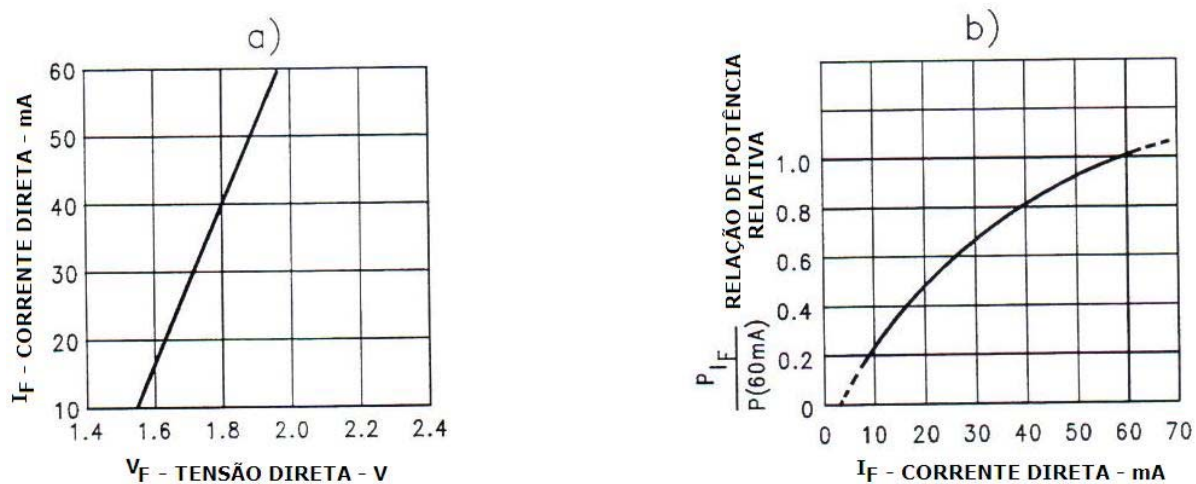


Figura 967.3 – Curvas características de um LED.

- a) Corrente direta versus tensão direta;
- b) potência óptica de saída versus corrente direta.

Diagrama Elétrico

Refere-se ao diagrama elétrico apresentado na FIG. 967.4. O sinal TTL representado por uma tensão de +5V correspondendo ao datum binário 1, e por uma tensão de 0V correspondendo ao datum binário 0 será aplicado a uma rede de portas NAND. Essas três portas serão conectadas como inversores: o primeiro atua como buffer ou separador enquanto as outras duas portas conectadas em paralelo geram (e absorvem, ou drenam) uma quantidade da corrente.

No estado ON a corrente I_{Fon} através do LED é fornecida pela fonte de alimentação (através dos resistores R57 e P4) e pelas portas TTL através de R54 – R55 e a combinação paralela de R56 / C23. O potenciômetro P4 permite variar o valor máximo da corrente fornecida ao LED. No estado OFF a corrente I_{Foff} é diferente de zero, mas ela é mantida a um valor mínimo por meio da queda de tensão que a corrente entrando nos portas TTL proporcionam sobre os resistores R54 – R55 – R56.

O circuito de alimentação por ser conectado ao LED de 660 nm (LED 2) ou ao LED de 820 nm (LED 1), por meio de alguns *jumpers*. O resistor R58 (de 10 Ω , em série com os LED) foi conectado aos diodos de forma a obter um valor da corrente que passa pelos LED, a partir da medida da queda de tensão nestes.

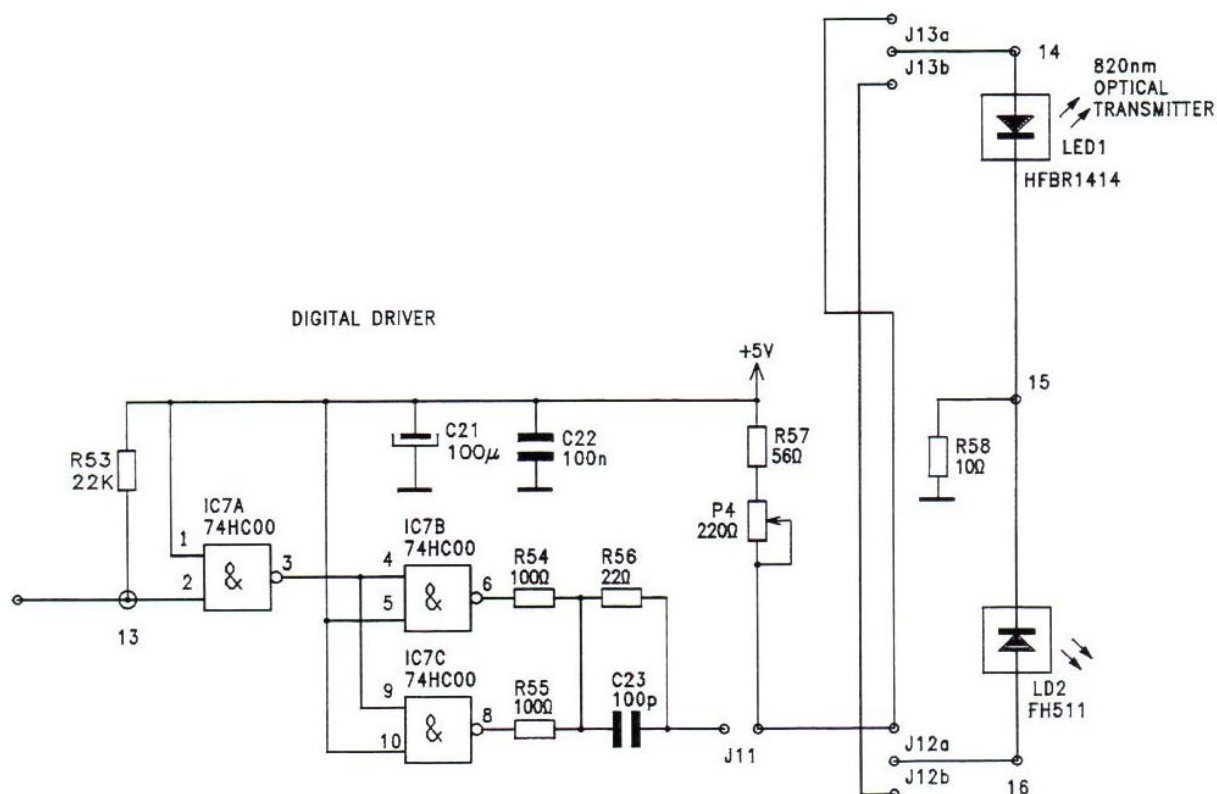


Figura 967.4 – Diagrama elétrico de um transmissor óptico digital.

967.1.2 – Receptor

Refere-se ao diagrama elétrico apresentado na FIG. 967.5. O sinal óptico transportado pela fibra é detectado por um fotodiodo PIN incluído no circuito detector. O fotodiodo gera uma corrente proporcional à radiação incidente. O amplificador de trans-impedância montado dentro do mesmo detector fornece uma tensão de saída proporcional à corrente de entrada. Um dos dois detectores (PD2 – 660 nm, PD1 – 820 nm) pode ser conectado aos circuitos posteriores por meios de alguns *jumpers*. O sinal de tensão é amplificado e quadrado (conformado) por três portas ECL consecutivas (IC8 – MC10116) sendo, em seguida, aplicado a um conversor ECL/TTL (transistores T8 - T9) cujo sinal de saída está no formato TTL.

Observe que o fotodetector está acoplado em AC ao amplificador ECL (um capacitor bloqueia o *offset* da corrente direta – componente DC). Isto impede a passagem de um possível *offset* da corrente direta de sobrepondo ao sinal. Desta forma, o sinal transmitido não deve ter qualquer *offset* da corrente direta. Isso pode ser obtido pelo emprego de codificadores (Manchester, Bi-Fase ou outros) na transmissão: seu objetivo é também gerar um sinal da corrente direta de sem *offset*.

Se o fotodetector foi acoplado em DC ao amplificador, poderia haver alguns problemas relacionados às variações de *offset* da corrente direta do sinal óptico recebido (que poderia levar à instabilidade da potência emitida pela fonte óptica, ou por outras razões). Nos sistemas de comunicações com fibra óptica (e mais usualmente, em todos os sistemas de comunicações) o *offset* da corrente direta do sinal a ser enviado é frequentemente eliminado (por meio de códigos adequados) antes da transmissão.

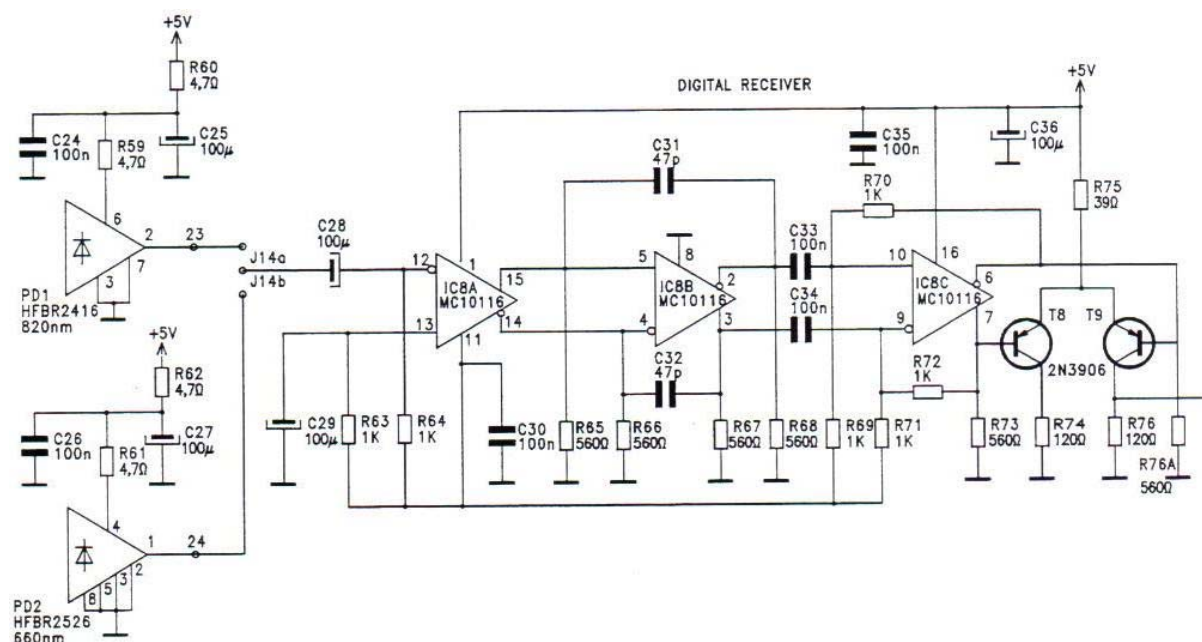


Figura 967.5 – Diagrama elétrico de um receptor óptico digital.

967.2 – Exercícios

UTF1 – Desconecte todos os *jumpers*.

FIP – Entre com o código da lição: 967.

967.2.1 – Corrente de pré-polarização dos LED

- Alimente o cartão de prática;
- Desconecte J12 e conecte J7b – J9b – J10b – J11 – J13b, tal que o circuito apresente a configuração mostrada na FIG. 967.6. Esta configuração inclui o LED de 820 nm e um sinal fixo, de 0V (nível lógico 0), será aplicado à entrada TTL (TP20);
- Observe a superfície do LED dentro do receptáculo.

Q1 – O que se pode observar?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | Embora ele esteja alimentado por um sinal de nível baixo, o LED está completamente desligado (<i>off</i>). |
| 2 | 3 | Embora ele esteja alimentado por um sinal de nível baixo, o LED emite uma intensidade de luz. |
| 3 | 2 | Embora ele esteja alimentado por um sinal de nível baixo, o LED não está completamente desligado (<i>off</i>). A intensidade emitida não depende da posição em que se encontra o <i>trimmer</i> BIAS. |

4 1 Embora ele esteja alimentado por um sinal de nível baixo, o LED não está completamente desligado (*off*). A intensidade emitida depende da posição em que se encontra o *trimmer* *BIAS*.

- Meça a queda de tensão V_{10} através do resistor de 10Ω conectado em série com o LED (entre TP15 e o terra ou GND). A corrente direta I_F através do LED é definida como se segue:

$$I_F = V_{10} / 10 \text{ [} V_{10} \text{ em mV, } I_F \text{ em mA]}$$

Esta corrente sempre existirá quando o sinal digital alimentando o LED for nível zero. Esta é a corrente de pré-polarização, mantendo o LED sempre ligeiramente ligado (*on*).

967.2.2 – Ajuste da potência de saída

- Mova o *jumper* J7 para a posição J7a, de forma a alimentar o circuito TTL com um sinal fixo de +5V (nível lógico 1);
- Meça a queda de tensão V_{10} através do resistor de 10Ω conectado em série com o LED (entre TP15 e o terra, GND). A corrente direta I_F através do LED será dado por:

$$I_F = V_{10} / 10 \text{ [} V_{10} \text{ em mV, } I_F \text{ em mA]}$$

A corrente I_F , bem como a máxima potência óptica emitida pelo LED, depende do ajuste do *trimmer* *BIAS* (P4).

967.2.3 – Formas de ondas do sinal transmitido

- Mova o *jumper* J7 para a posição J7c, tal que o circuito TTL seja alimentado com um sinal de dados alternando entre 0 e 1;
- Conecte o osciloscópio nos pontos TP20 e TP15. Uma tensão proporcional à corrente através do LED está disponível no ponto TP15;
- Aumenta a corrente de polarização *BIAS* para o máximo (*trimmer* P4 girado completamente para a direita).

Q2 – O se pode observar na forma de onda detectada no ponto TP15?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | 4 | A amplitude aumenta. |
| 2 | 3 | A forma de onda está distorcida. De fato, o LED está alimentado para a condição <i>off</i> , em um região não linear. |
| 3 | 5 | A frequência dobra. |
| 4 | 1 | A amplitude aumenta. De fato, o LED está alimentado com uma corrente maior. |
| 5 | 2 | Não existem variações. |

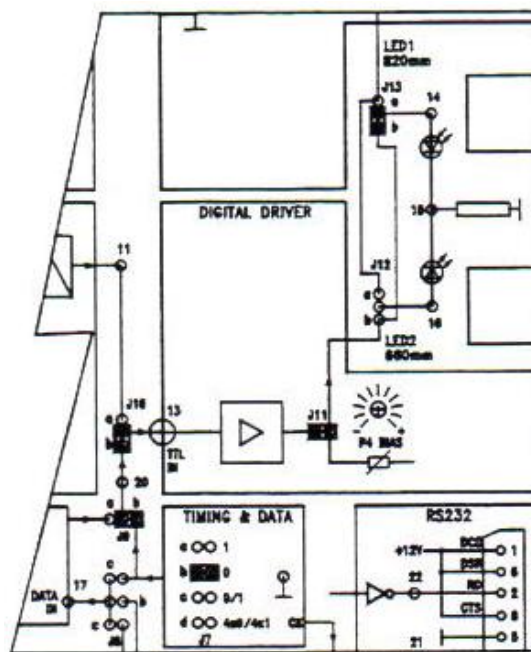


Figura 967.6 – Cartão de prática.

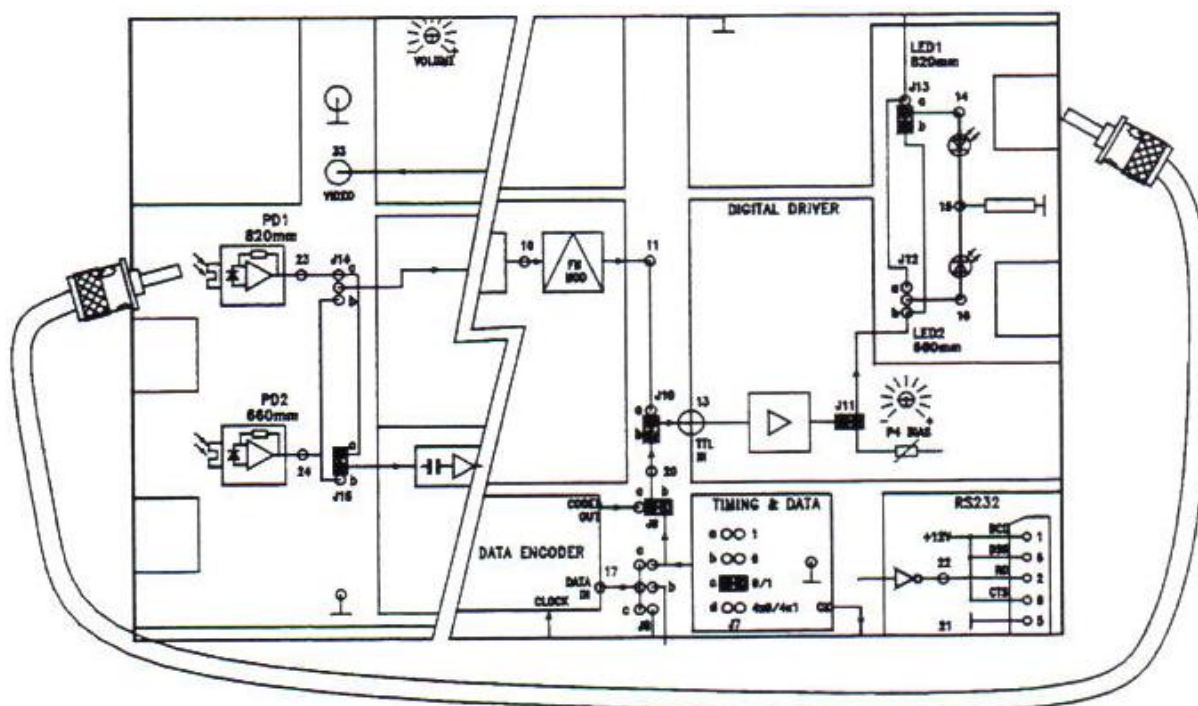


Figura 967.7 – Montagem no cartão de prática.

967.2.4 – Comprimento de onda operacional

- Desconecte J12 e, em seguida, conecte J7c – J9b – J10b – J11 – J13b – J15a, tal que o circuito apresente a configuração mostrada na FIG. 967.7. Esta configuração inclui o LED e o fotodiodo de 820 nm, e um sinal de dados alternando entre 0 / 1 será aplicado à entrada TTL (PT20);
- Conecte o LED 1 ao fotodiodo PD 1 por meio do cabo #4 (fibra óptica 50/125);
- Conecte o osciloscópio aos pontos TP15 e TP23. Uma tensão proporcional à corrente através do LED será detectada no ponto TP15, enquanto que a forma de onda da tensão detectada pela montagem “fotodiodo + amplificador de trans-impedância” está disponível no ponto TP23;
- Agora, mova a fibra óptica do fotodiodo PD 1 (820 nm) para o fotodiodo PD 2 (660 nm), utilizando o conector HP-ST e o adaptador ST-ST. Conecte J15b e observe a forma de onda na saída do detector PD 2 (TP24).

Q3 – Qual das seguintes afirmativas é verdadeira?

Grupo

A B

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | 2 | O sinal recebido é igual àquele detectado no caso anterior (fonte 820 nm e detector 820 nm). |
| 2 | 1 | O sinal recebido é muito menor, porque a atenuação da fibra óptica é maior a 820 nm do que em 660 nm. |
| 3 | 4 | O sinal recebido tem amplitude menor, porque o fotodiodo PD 2 adquire sua máxima sensibilidade a 660 nm enquanto que para o fotodiodo PD 1 ela ocorre em 820 nm. |

- 4 3 O sinal recebido é maior que àquele detectado no caso anterior (fonte de 820 nm, detector de 820 nm), porque o fotodiodo PD2 tem uma área sensível maior do que a do fotodiodo PD 1.

967.2.5 – Formas de ondas do sinal recebido

- Arranje o circuito como aquele apresentado na FIG. 967.7. Esta configuração inclui o LED e o fotodiodo a 820 nm;
- Conecte o LED 1 ao fotodiodo PD 1 por meio do cabo #4 (fibra óptica 50/125);
- Observe as formas de onda no ponto TP20 (sinal TTL transmitido), TP15 (tensão proporcional à corrente passando pelo LED), TP23 (tensão detectada pela montagem "fotodiodo + amplificador de trans-impedância), TP25 (sinal TTL recebido), utilizando um osciloscópio.

967.2.6 – Utilização de vários tipos de fibras ópticas

Fibra 200/230 (cabo #3)

- Remova a fibra óptica 50/125 (cabo #4) e conecte a fibra 200/230 (cabo #3);
- Gire o potenciômetro (P4), *trimmer* BIAS, completamente para a direita (máxima corrente de polarização);
- Observe a forma de onda disponível no ponto TP23.

Q4 – Qual das seguintes afirmativas é verdadeira?

Grupo

A B

- 1 2 O sinal recebido é igual àquele detectado no teste anterior (fibra óptica 50/125, cabo #4).
 - 2 3 A amplitude do sinal é muito menor com relação ao caso anterior. Isso se deve ao fato de que a fibra óptica 200/230 (cabo #3) caracteriza-se por apresentar uma atenuação maior do que a fibra óptica 50/125 (cabo #4).
 - 3 4 A amplitude do sinal é muito menor com relação ao caso anterior. Isso se deve ao fato de que a fibra óptica 200/230 (cabo #3) tem uma Abertura Numérica maior do que a da fibra óptica 50/125 (cabo #4).
 - 4 1 A amplitude do sinal é muito menor com relação ao caso anterior, porque o detector recebe uma potência óptica muito alta e satura. Isso é devido ao fato de que a potência que penetra a fibra óptica 200/230 (cabo #3) vinda da fonte é maior; de fato, esse tipo de fibra tem uma maior Abertura Numérica. Ainda que a fibra óptica 200/230 (cabo #3) apresente uma atenuação maior do que a fibra 50/125 (cabo #4), isto não tem influência uma vez que o comprimento do cabo é pequeno.
- Reduza a potência óptica (ajuste BIAS) ou mude a fibra óptica do detector ou do LED e observe que o sinal detectado apresenta-se de forma correta.

Fibra mono modo (cabo #5)

- Repita as medidas anteriores utilizando a fibra mono modo 10/125 (cabo #5). A potência óptica de saída é muito pequena devido ao valor da Abertura

Numérica ser muito pequena para as fibras mono modo. Por esta razão, a recepção, realmente, não será possível.

Fibra plástica (cabos #1 e #2)

- Repita as medidas anteriores utilizando a fibra plástica (cabo #1, 1,5 m). A atenuação de uma fibra plástica a 820 nm é muito maior do que a de uma fibra de vidro, contudo o sinal recebido (TP23) apresenta uma amplitude menor;
- Troque a fibra plástica de 1,5 m por aquela de 5 metros (cabo #2). Como a fibra óptica é maior, o sinal óptico será mais atenuado.

967.3 – Questões

Q5 – Que tipo de sinais pode ser aplicado ao *Digital Driver* do cartão de prática?

Grupo

A B

1 4 COMOS

2 5 TTL

3 2 RS 232

4 1 ECL

5 3 V24

Q6 – Porque os LED são pré-polarizados?

Grupo

A B

- 1 3 Porque o LED deve sempre operar no estado ON. Isto reduz o tempo de resposta.
- 2 1 Porque o LED deve sempre operar próximo à saturação. Isto reduz o tempo de resposta.
- 3 4 Porque o LED deve ser alimentado com tensões alternadas.
- 4 2 Pré-polarização não são aplicadas aos LED, mas aos fotodiodos.

Q7 – Os fotodiodos inclusos no cartão de prática:

Grupo

A B

- 1 2 Apresentam igual sensibilidade a 660 nm; PD 1 inclui um pré-amplificador de trans-impedância; PD 2 inclui um pré-amplificador de alta impedância; ambos são montados em um receptáculo ST.
- 2 4 PD 1 atinge sua máxima sensibilidade a 820 nm, PD 2 a 660 nm; ambos incluem um pré-amplificador de trans-impedância; PD 1 está montado em um receptáculo ST, PD 2 em um receptáculo *Snap_In HP*.
- 3 1 PD 1 atinge sua máxima sensibilidade a 660 nm, PD 2 a 820 nm; ambos incluem um pré-amplificador de trans-impedância; PD 1 está montado em um receptáculo ST, PD 2 em um receptáculo *Snap_In HP*.
- 4 3 PD 1 atinge sua máxima sensibilidade a 820 nm, PD 2 a 660 nm; ambos incluem um pré-amplificador de trans-impedância; PD 2 está montado em um receptáculo ST, PD 1 em um receptáculo *Snap_In HP*.

